



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL DETERIORO QUE
POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA
SE PRESENTA EN EQUIPO
TELFÓNICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

OSVALDO ZAVALA REYES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ARMANDO ORTIZ PRADO



CD. UNIVERSITARIA JUNIO 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A **“DIOS”** la persona más importante, valiosa y primordial en mi vida que siempre has estado a mi lado; que me ha guiado, instruido y aconsejado a lo largo de mi existencia; que me ha enseñado a ser sencillo ante todo, dar mucho amor y servir a los de más personas; como también el proceso para poderme titular y ver cristalizado mi sueño, gracias a ti que sin tu ayuda no lo hubiera logrado este objetivo tan importante en mi vida que me propuse al inicio de la licenciatura de ser Ingeniero Mecánico.

A la **“UNAM”** por su valiosa colaboración y aportación, por su disciplina como por enseñarme los tres principios básicos para mi formación de Ingeniero; que son la de ser un triunfador, tener ética hacia la vida y la más importante nunca rendirse ante la adversidad, no me queda más que darte las gracias por todo lo que he aprendido dentro de todas tus instalaciones también por que me abriste las puertas para que estudiara, creciera y me superara en esta máxima casa de estudios.

A mis **“PADRES”** en primer lugar a mi papa el señor **“Francisco Zavala Paniagua”** ya que con regaños, enojos y consejos que tubo conmigo entendí que eran para mi bien ya que me sirvió para valorar, apreciar más mis estudios y ponerle más ganas para salir adelante (los ejemplo son el de creer y convencerse en si mismo; como también el de la constancia y disciplina se logra todo lo que se propone uno), pero más que nada por ese apoyo súper incondicional y la paciencia que me tubo para poder ver cristalizado este reto que tuve, de ante mano gracias papa te admiro (no sabes cuanto) te quiere tu hijo.

En segundo lugar a mi mama la señora **“Sara Reyes”** por todo su apoyo también súper incondicional que tubo hacia mi que era la principal consejera en mi vida que me dijo que no me rindiera (eso lo aprendí muy bien de ti que hasta que sonara la campana me diera por vencido) en ningún momento, todos tus consejos los trate de seguir al pie de la letra (como el de ser sencillo) gracias mama te admiro y te quiere tu hijo.

A mis **“HERMANOS”** en primer plano a mi hermano **“Francisco Zavala Reyes”** que en todo momento sentí ese apoyo incondicional que me diste para seguir adelante en esta prueba que tenia, muchas gracias por tus consejos que me diste ya que me sirvieron mucho para salir adelante; sabes que te admiro por ese valor y seguridad que siempre muestras ante la vida por más adversidad que tengas te quiere tu hermano.

A mi hermano **“Gilberto Zavala Reyes”** muchas gracias por todo tu apoyo incondicional que todos tus consejos me han servido para moldearme, en verdad muchas gracias por todo hermano también te admiro ya que eres entrega, pundonor y constancia en tu trabajo por más que este cansado se va a trabajar nunca hecha pretextos (te acuerdas de esto ya no hables ponte actuar) tu hermano quien te quiere mucho.

A **“Cesar Zavala Reyes”** mi otro hermano al cual admiro, respeto y quiero mucho, gracias por todos tus consejos sobre todo te admiro el que nunca te desesperas por más presión que uno tenga hay que mantener siempre la calma tu hermano.

A mis **“CUÑADAS”** sobre todo a mi cuñada más que nada con la que he convivido más tiempo ya que fue la primera cuñada que tuve **“Mari Carmen Hernández Borja”** que

Agradecimientos.

en todo momento me guió y confió en mi para poder salir adelante, pero también me ayudó mucho para poder hacer cosas que yo creí que no podía, muchas gracias cuñada te quiere y te admira (por tu disciplina hacia el estudio) tu cuñado.

A **“Blanca Ortega”** que en todo momento estuvo conmigo, pero sobre todo por ese apoyo incondicional que me mostró; cuñada muchas gracias te quiere y te admira (por tu comprensión, paciencia y alegría hacia la vida) tu cuñado.

A mi **“SOBRINO”** pero más que nada a **“Oscar Zavala Hernández”** que siempre ha creído en mí y también admirado, muchas gracias hijo ya que este logro es también para ti, ya que por más que me doblaba para no terminar gracias a **“DIOS”** regresaba por ti, ya que ibas a ver una imagen de perdedor y la verdad que no lo soy, te admira (por tu espíritu indomable que muestras hacia lo que haces) y te quiere tu tío.

A mis de más **“SOBRINO(A) S”** los hijos de mi hermano **Paco**; que son Francisco y Jesús Eduardo Zavala, la hija de mi hermano **Gil**, Abigail Guadalupe Zavala, las hijas de mi hermano **Cesar**; María Guadalupe y María Fernanda Zavala; les agradezco que también sean parte de mi motivación a todos ustedes su tío quien lo(a) s quiere.

A la persona que es el amor de mi vida que siempre me ha apoyado incondicionalmente la cual siempre ha estado en los momentos buenos, alegres, tristes, difíciles y amargos, que siempre me ha tenido mucha paciencia, una fe ciega en mí y comprensión que este sentimiento no se compra con nada; pero sobre todos por todos tus consejos que me diste para poder salir adelante en mis estudios profesionales para poderme titular en verdad muchas gracias mi **“LULU”** quien te ama mucho.

A todos mis profesore(a) s desde la escuela hasta la preparatoria; como son las maestras Ma. Carmen Alcaraz Olvera, Margarita de los Cobos, Lourdes, Gabriela, María Soledad, Ma. Del Carmen, Fabiola García, Estela, Norma Lizcano, Elizabeth, como también a los profesores Joel y Héctor Oros, Guillen, Ing. Abisrael López, Modesto Nava, Felipe, Claudio García, Alfonso Sandoval, Bernardo, Lugo, Lesso, el Pollo y Hugo Sánchez.

También a todos mis compañero(a) s de la escuela hasta la secundaria como son Oscar Isaac, Daniel, José Flores Duarte, Esmeralda, Yeslia Paloma, Martha, Oliver, Brenda, Nadia Loe, Nadia Lorna, Patricia, Nadia, Esther, Gabriela Alcocer, Catalina Cesar Ortega, Carlos Aguilera, Francisco Javier, Israel, Alcántara, España, Mario Martínez, Víctor Martínez, Pedro, Salvador Ortega, Salvador, Armando.

A todos mis compañero(a) s de preparatoria María Eugenia García, Juanita Moreno, Anita, Fabiola, Guadalupe Jalpa, Elsa Murillo, Silvia, Esther, Iris Sayavedra, la China, Xochitl, Liliana, Erica, Karla, Maribel, Mónica Lizcano, Yadira, Irasema, Miriam, Rafael, Samuel Delgado, Andrés, El Chilo, Carlos Rosas, Juan Gabriel, Manuel, Tomas, Daniel, Casado, Oscar, Salvador, Eleazar, Grajeda, José Romo, Los Vaqueros de Valtierra, Jorge Gallardo, Jorge, Jorge el de Morelón, Toninho, Gonzalo, Luis Caudillo, el Kilos, Aguayo, Enrique, Gilberto, Osvaldo Mares.

Mención aparte a todos mis compañero(a) s de preparatoria que me regalaron los momentos más maravillosos e inolvidables de mi vida por que ahí es donde decidí estudiar ingeniería, y con los que sigo compartiendo su verdadera amistad, Sonia

Agradecimientos.

Franco, Claudia Analis, Verónica Villasana, Esaú Fortuna, Osvaldo Delgado, Juan Arredondo, Iván Banda, Felipe Cervantes, Cesar Rivera.

Un pequeño Homenaje les dedico también en esta tesis a todos mis profesore(a) s que me dieron cátedra en la Facultad de Ingeniería (FI) y por sembrar la inquietud de superarme, como son M.I. Magdalena Trujillo, M.I. Sara Cerrud (q.p.d), M.I. Silvina Hernández García, Ing. Elizabeth Moreno, Ing. Ma. Carmen Maldonado, Ing. Gabriela Gallegos, Ing. Antonia Pérez, Ing. Rosa Estrada, M.I. Marina Ensastegui, Ing. Margarita Luna, Ing. Margarita Galindo, Ing. Ma. Carmen Olvera, Ing. María Lobera, Fis. Juan Velázquez, Fis. Edgar Jaramillo, Ing. Erick Castañeda, M.I. Gustavo Balmori, Dr. Baltazar Mena, Ing. Eduardo Carranza Torres, Ing. Felix Cuevas, M.I. Eduardo López Maya, Ing. Mario Velasco Jiménez, M.C. Guadalupe Miss Paredes, Ing. Olivero Ontiveros, Ing. Rafael Prieto Meléndez, Ing. José Esquivel Sánchez, Lic. Quity Guzman, Lic. Ma. Eugenia Claps Arenas, Lic. Maria Ceja Velásquez, Dr. Ma. Carmen rojas, M.I. Liliana Arganiz Juárez, Ing. Jorge Ramírez, Ing. Humberto Oliva Chavez, Ing. Eduardo Lemus, Ing. Eduardo Medina, Ing. José Bonilla, M.I. Jose Zenith, Ing. Rolando Peralta, Dr. Javier González Villela, Dr. Ignacio Juárez Campos, Ing. José Angiano, Dr. Oscar Rojas, Dr. Rubén Ávila Camacho, M.C. Rafael Schuwernars, M.I. Eduardo Márquez, Ing. Eduardo Garduño, Ing. José Nieves, Ing. Hector Sanchez, M.I. Guillermo Mancilla, Ing. Alejandro Cortes Eslava, M.I. Carlos Mariche, Dr. Barba Pingaron, Ing. José Sánchez Espinosa, Ing. Víctor Huarota, Ing. Héctor Mejía, Ing. Fernando Chagoya, M.I. Marco Aurelio Torres Herrera, Ing. Gustavo Becerra, M.I. Gustavo Valeriano Barrientos, Ing. Francisco López Rivas, Ing. Moisés Linares M.I. Ma. Guadalupe Duran Rojas, Dr. Edmundo Cozatl, Ing. Arturo Zapata y Rosales, M.I. Edgar Ramirez, M.I. Billy Macedo M. I. Ulises Peñuelas.

A mi director de tesis que por su comprensión, por su total apoyo y por su devoción a que este proyecto saliera adelante al Dr. Armando Ortiz Prado, no me queda más que mínimo de agradecerle por esos consejos que medio para poder sacar la tesis.

A los asesores como son Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz por su total apoyo para poder salir adelante con esta tesis, pero mas que nada por su comprensión en momentos difíciles para poder solucionarlos y poderme titular, al Dr. José Javier Cervantes Cabello, de igual forma gracias por apoyarme para lograr este objetivo, al M.A. Jesús Robirosa López, Ing. Mariano García del Gallego Ing. José Revueltas.

A todos mis compañeros de carrera gracias por poderme ayudar en su debido tiempo como también creo que fue mutuo a todo(a)s no me queda que decirle que dejaron una huella muy importante en mi corazón, pensamientos y actitudes.

A mi compañera de generación “**Elizabeth Pastrana Licea**” por toda su comprensión, consejos y ética que me tubo para que yo saliera adelante gracias amiga en verdad no sabes cuanto aprecio tu amistad por todos los momentos difíciles que tuviste a mi lado, para que ambos pudiéramos sacar las materias mas difíciles que nos faltaban por cursar.

A mi compañero “**Ernesto Morales García**” por tus grandes consejos que me sirvieron para poder ser mejor persona, pero sobre todo que me escuchaste y que estuviste en los momentos mas difíciles de la vida para poder sacar esta carrera adelante en verdad amigo del alma gracias por tu amistad que siempre me la has brindado.

Agradecimientos.

A mi compañero **“Serafín Hernández Juárez”** por ser una persona que me brindo siempre su apoyo desde que lo conocí, pero sobre todo por ese ímpetu de estar compitiendo sanamente entre nosotros dos para ver quien era el mejor que eso nos motivo para que los dos saliéramos adelante gracias en verdad no tienes idea de cuanto te pareció para que este sueño se cristalizara y poderlo llevar a cabo.

A mi compañero sentimental **“Fernando Cruz Hernández”** por tu forma de aconsejarme de entenderme pero sobre todo de que yo comprendiera todo lo que tu me dijiste en su momento para poder yo ver realizado este sueño de poderme titular gracias en verdad no tienes idea de cuanto significas en mi vida.

A mi compañero y amigo del alma **“Moisés Varela Vega”** por todo tu apoyo incondicional que siempre me brindaste, pero sobre todo por toda tu paciencia hacia mí ya que a lo mejor hubo momentos de indiferencias pero siempre supe que tenía un gran amigo en ti, ya que en los momentos mas difíciles de mi vida siempre estuviste ahí.

A mi compañero que también estuvo en ese momento que mas necesitaba de el **“Ramón Rosas Olascoaga”**, es decir en esos momentos difíciles, complicados y desoladores, para poder salir adelante en mi carrera, pero también en mi crecimiento personal, en verdad ramón no tienes idea de cuanto te estimo gracias por todo.

A todas las familias de mis compañeros y hermanos del alma que aquí menciono en verdad también a ustedes los tengo bien presentes se que con algunos compartí mas momentos como se dice de intimidad, ya que conocí en algunos casos a sus abuelitos, padrinos, tíos, sobrinos, etc, en verdad también a todos ustedes señores miles de gracias por estar en ese momento tan importante de mi vida para poder culminar mis estudios.

A la familia de mi cuate **“Esaú Fortuna Cruz”** a todos ellos muchas pero muchas gracias por haberme apoyado en todo momento desde que llegue a esta Ciudad, ya que me enseñaron como salir, subsistir y salir adelante en esta enorme ciudad, pero sobre todo a que nunca renunciara a mis sueños, y siempre estuvieron en los momentos mas difíciles de mi vida gracias por todo no tienen idea de cuanto significan en mi vida a la familia **“Ramírez Cruz, Cruz Salinas pero también a sus abuelitos”**

A mi compañero de generación que supo estar también en los momentos mas importantes de mi vida y que no tengo con que agradecerle por todo ese apoyo que me ha brindado y que me ha ayudado siempre en verdad no tienes idea de cuanto te estimo a ti mi amigo **“Francisco Javier Ocampo Corrales”**

A todos los trabajadores del Manufactura es decir del area de tornos, a los señores Don Rafa e hijo, a los 2 migueles, a piolin, a Emiliano, gracias por su apoyo tan importante que me dieron para cristalizar este sueño un abrazo muy especial para ustedes.

ÍNDICE

<i>Objetivo</i>	1
<i>Introducción</i>	2
<i>Capítulo 1. Corrosión atmosférica</i>	
1.1 Generalidades	5
1.2 Factores que afectan los procesos de corrosión atmosférica	8
1.3 Principales contaminantes atmosféricos	12
1.4 Principales contaminantes que afectan la velocidad de corrosión atmosférica	18
1.5 Ciclo atmosférico del azufre y el nitrógeno	21
1.6 Mapas de la corrosividad atmosférica	25
1.7 Efectos sobre los materiales	28
1.8 Corrosión atmosférica en interiores	29
<i>Capítulo 2. Deterioro en equipo electrónico por efecto del medio ambiente</i>	
2.1 Antecedentes generales	31
2.2 Variables principales del daño por corrosión atmosférica, su efecto y procedencia	35
2.3 Metales y aleaciones comúnmente utilizadas en dispositivos electrónicos y su sensibilidad a la presencia de contaminantes	37
2.4 Inconvenientes generados por efecto de la corrosión atmosférica en diversos elementos y dispositivos electrónicos	39
2.5 Tipos de corrosión en dispositivos electrónicos	45
2.6 Corrosión en diferentes tipos de atmósferas	47
<i>Capítulo 3. Análisis del deterioro del equipo electrónico, por corrosión atmosférica, para las condiciones climáticas características de la República Mexicana</i>	
3.1 Conceptos generales	50
3.2 Acción de los principales contaminantes en el interior de los equipos electrónicos	51
3.3 Análisis del deterioro en aparatos telefónicos de tipo residencial	58
<i>Capítulo 4. Estudio del deterioro sufrido en equipo telefónico instalado en la zona centro de la República Mexicana</i>	
4.1 Diagnóstico de las observaciones en equipo electrónico debido al	

Indice.

deterioro generado por efectos ambientales	67
4.2 Tarjetas provenientes de Celaya Guanajuato.	67
4.3 Resultados de la inspección preliminar de las tarjetas telefónicas provenientes de Morelia, Michoacán	70
4.4 Resultados de la inspección efectuada en tarjetas telefónicas provenientes de la ciudad de Querétaro, Querétaro	75
4.5 Comentarios de los resultados obtenidos	78
<i>Capítulo 5. Conclusiones</i>	80
<i>Bibliografía</i>	82
<i>Sumario</i>	85

OBJETIVO

Determinar el efecto que las variables ambientales, tienen en la corrosión de componentes, pistas y microcircuitos empleados en teléfonos de uso residencial.

INTRODUCCIÓN

En un grado u otro, la mayoría de los materiales experimentan algún tipo de interacción con gran número de diversos ambientes. A menudo, estas interacciones limitan la utilidad de un material como consecuencia del deterioro de sus propiedades mecánicas (por ejemplo ductilidad y resistencia), de otras propiedades físicas o de su apariencia. Ocasionalmente, el comportamiento de degradación de los materiales para algunas aplicaciones se ignora y las consecuencias son adversas.

En los mecanismos de deterioro en los metales que es el caso que se va a estudiar hay pérdida de material por disolución (corrosión) o también por formación de una capa o película no metálica (oxidación).

Por su parte la corrosión se define como el ataque destructivo e involuntario de un metal. Este ataque es electroquímico y generalmente empieza en la superficie. Puesto que la corrosión es causada por una reacción química, la velocidad a la que la corrosión tiene lugar depende en cierta medida de la temperatura y de la concentración de reacciones y productos. El esfuerzo mecánico y la erosión son factores que pueden contribuir también a la corrosión.

La mayor parte de la corrosión de materiales que se produce por ataque químico de los metales, ocurre normalmente por ataque electroquímico, al poseer los metales electrones libres son capaces de constituir celdas electroquímicas en su interior. La mayor parte de los metales son corroídos en alguna extensión por el agua y la atmósfera. Los metales pueden ser también corroídos por ataque químico directo de soluciones químicas e incluso metales líquidos.

La corrosión de los metales puede considerarse en cierta medida como el proceso inverso de su obtención (metalurgia extractiva). La mayor parte de los metales existen en la naturaleza en estado combinado, por ejemplo como Óxidos, Sulfuros, Carbonatos o Silicatos. En estos estados combinados la energía del compuesto se reduce espontáneamente a reaccionar químicamente para formar compuestos. Por ejemplo, los Óxidos de hierro existen comúnmente en la naturaleza y para reducirse a hierro metal, cuyo estado energético es superior, se requiere energía. Sin embargo, hay una tendencia de hierro metal a pasar espontáneamente a Óxidos de hierro por corrosión y así alcanzar un estado de menor energía.

Cabe mencionar que la mayoría de los metales (excepto los nobles) en contacto con el medio ambiente son termodinámicamente inestables. Todos debieran reaccionar y convertirse en óxidos.

El primer estudio que se realizó con relación a la corrosión en equipo eléctrico y electrónico fue durante la década de los 30, pero no se le prestó tanta importancia y esto se debió a que en las centrales telefónicas automáticas, los relevadores utilizados son los que presentaban fallas por efecto del medio ambiente; posteriormente durante la década de los 60 en la guerra de Vietnam, los equipos electrónicos americanos tanto el de comunicación como el de armamento sufrieron varios fracasos; debido principalmente a los fenómenos corrosivos atmosféricos originados por condiciones medioambientales extremas predominante en esa región. Los diseñadores de equipo

Introducción

electrónicos militares no consideraron el posible daño de corrosión. Como consecuencia de estas observaciones se dio un amplio impulso al estudio de la corrosión atmosférica en equipo electrónico.

El medio agresivo en el que se originan más del 50% de las pérdidas totales atribuibles a fallas en los diferentes equipos electrónicos que existen en la actualidad (como teléfonos alámbricos e inalámbricos, computadoras, televisores; etc); se debe a la existencia de fenómenos de corrosión, que en este caso es la corrosión atmosférica. ¿El motivo? Se calcula que más del 80% del material metálico está expuesto a las diferentes condiciones atmosféricas climáticas y sus precipitaciones, donde existe una capa de humedad que actúa como electrolito, generando, por lo tanto, una corrosión de carácter electroquímico.

La corrosión atmosférica depende del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica, y por ello, está ligada a la combinación de una serie de factores. Los más importantes son el poder contaminante intrínseco de la sustancia, así como una serie de factores climáticos entre los que cabe destacar la humedad y la temperatura.

Los principales contaminantes son:

- El dióxido de azufre (SO₂).
- Los cloruros (Cl⁻).
- Los óxidos de nitrógeno (NO_x).
- Anhídrido carbónico (CO₂).

En función de la naturaleza de los contaminantes, se distinguen varios tipos de atmósferas:

- Industrial.
- Marina.
- Urbana.
- Rural.
- Cuando hay una mezcla de influencias entre atmósferas como urbano-marina, industrial-marina, urbano-industrial-marina, etc.

Por otro lado, y de acuerdo con el clima, las atmósferas pueden ser: secas, húmedas, lluviosas, tropicales y polares, dentro de las cuales es posible hacer igualmente una serie de matizaciones; por ejemplo, atmósfera tropical lluviosa. Para clasificar plenamente una atmósfera, se tendrá que tener en cuenta el conjunto de factores climáticos y de contaminación. Es por ello que la conjunción de esta serie de factores da lugar a una gran variedad de condiciones ambientales, que poseen una mayor o menor agresividad. En este sentido, una de las peores combinaciones que pueden darse es la de una atmósfera industrial-marina con un clima de alta humedad; como se analizara en los capítulos posteriores.

La corrosión atmosférica en componentes o equipos electrónicos se manifiesta de varias maneras. Las computadoras, los circuitos integrados, y los microchips en los últimos tiempos ha sido una parte importante en todos los productos tecnológicos que se

Introducción

utilizan en la industria, como son los casos tanto de la industria aeroespacial como de la industria automotriz, como también son los productos y equipos médicos, por lo tanto se exponen a una variedad de condiciones ambientales. La corrosión atmosférica en componentes electrónicos es insidiosa y no puede ser detectada fácilmente; por lo tanto, cuando ocurre la falla debido a la corrosión atmosférica, lo que se hace es sustituir la pieza o el componente. Debido a la dificultad para detectar y para identificar fallas por corrosión atmosférica, el costo de la corrosión atmosférica es difícil de determinarse y es discutible, en muchos casos, particularmente en el caso de la electrónica del consumidor, tales dispositivos llegaron a ser tecnológico obsoletos antes de que se presente en los equipos electrónicos las fallas por corrosión atmosférica.

Debido a que la tecnología se debe de adaptar a las necesidades de los consumidores, que en muchos casos prefieren equipos electrónicos portátiles, la tecnología se vio en la necesidad de diseñar y manufacturar equipos electrónicos lo mas pequeño posible, empezando con esto con la miniaturización de estos equipos electrónicos como son los teléfonos celulares, palms, laptops, cámaras digitales, etc; los cuales sus dimensiones lo mas pequeños posibles (nano tecnológicos) día con día; considerando esto es posible que fallen en su totalidad o casi en su totalidad los equipos electrónicos por influencia, por efecto y por deterioro generadas por la corrosión atmosférica.

Guttenplan (1987, hizo un estudio más profundo) se dio cuenta de las fallas y causas importantes que se presentan en los equipos electrónicos por influencia de la corrosión atmosférica; las cuales son:

- Mayor resistencia al desgaste en los componentes electrónicos, sus desventajas serian un menor tamaño, espaciamento y secciones metálicas en los equipos electrónicos.
- Problemática de las tarjetas electrónicas con baja resistencia.
- Exposición del equipo electrónico a condiciones más extremas.

Para la evaluación de la resistencia a la corrosión de sistemas y equipos electrónicos que trabajarán bajo condiciones de deterioro generadas por el medio ambiente, se han aplicado una serie de ensayos, entre los cuales se encuentran el de cámara de niebla salina, cámara de ciclos de humedad, cámara de gases, etc, en los cuales se pueden controlar algunas o casi todas de las variables que tiene el medio ambiente. Sin embargo, este y otros que se han elaborado para tal efecto no tienen ninguna relación con las condiciones reales de servicio, por lo que es necesario un método de evaluación que permita simular de forma acelerada los fenómenos de deterioro por efectos ambientales.

Todos los estudios y análisis relacionados con la corrosión atmosférica en el diseño y manufactura de los equipos electrónicos van orientados principalmente a las condiciones ambientales que tienen los países más industrializados (son los que más dinero invierten con respeto a este tema), en la que también deben de considerarse las condiciones ambientales de los países subdesarrollados.

CAPÍTULO 1. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

1.1 GENERALIDADES

Uno de los factores que determina primariamente la intensidad del fenómeno corrosivo en la atmósfera es la composición química de la misma. El SO_2 y el NaCl son los agentes corrosivos más comunes de esta. El (NaCl) se incorpora a la atmósfera desde el mar. Lejos de éste, la contaminación atmosférica depende de la presencia de industrias y núcleos de población, siendo el contaminante principal por su frecuencia de incidencia sobre el proceso corrosivo el dióxido de azufre (SO_2), proveniente del empleo de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre.

Los contaminantes se clasifican en primarios y secundarios:

- Los primarios son aquellos emitidos directamente por fuentes o focos identificables, estos, son emitidos en cantidades apreciables soliendo tender a poseer una estructura química relativamente simple como son, SO_2 , NO_2 , CO_2 , SH_2 , NH_3 , ClH y partículas sólidas entre otros.
- Los contaminantes secundarios son los generados en la misma atmósfera, bien por reacción química entre dos o más contaminantes primarios, pasándose a denominarse estos últimos precursores, o simplemente ocurre el proceso con los constituyentes normales del aire, con o sin la intervención de procesos de foto activación. Se incluyen en este grupo las partículas finas procedentes de diversos procesos.

Es un hecho constatado que, quienes hacen más daño a la contaminación atmosférico en general son los secundarios (Ozono troposférico, lluvia y neblinas ácidas, etc.), se les adjudica unos efectos de mayor gravedad y agresividad sobre el medio que los contaminantes primarios, pues estos estan limitados a una extensión (pasando después a secundarios).

Las emisiones primarias originadas por los focos naturales provienen fundamentalmente de los volcanes, incendios forestales y descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos.

Por su parte, los principales focos antropogénicos de emisiones primarias se pueden clasificar de acuerdo a la (tabla 1.1) en:

Tabla 1.1. Tipos de fuentes emisoras (naturales y antropogénicas) [1].

Focos fijos o puntuales	Industriales	Procesos industriales
		Instalaciones fijas de combustión
	Domésticos	Instalaciones de calefacción
Focos móviles o lineales	Vehículos automóviles	
	Aeronaves	
	Buques	
Focos compuestos o planos	Aglomeraciones industriales	
	Áreas urbanas	

En la siguiente (tabla 1.2) se muestra la proporción entre las emisiones primarias naturales y segundas antropogénicas para los distintos contaminantes.

Tabla 1.2. Diferentes proporciones de las fuentes emisoras existentes [1].

Focos de emisión		
Contaminante	Antropogénicos %	Naturales %
Aerosoles	11.3	88.7
SO _x	42.9	57.1
CO	9.4	90.6
NO	11.3	88.7
HC	15.5	84.5

Las cifras anteriores muestran la gran importancia que, en cuanto a emisiones globales, tienen las fuentes naturales de emisión de contaminantes en relación con los antropogénicos, excepto en el caso de las emisiones de anhídrido sulfuroso en que casi se igualan ambas.

Atendiendo a la distribución espacial de estas emisiones se observa que en las regiones más industrializadas de Europa y Norteamérica las emisiones antropogénicas de SO₂

[1] Referencia de la Bibliografía.

alcanzan proporciones muy superiores a las naturales. Así en el Norte de Europa las emisiones antropogénicas originan alrededor del 90% del azufre que está en circulación en la atmósfera.

Otra circunstancia a tener en cuenta es que los focos de emisión antropogénicos están concentrados, por lo general, en áreas urbanas e industriales. Este conjunto de circunstancias hacen que la contribución de las emisiones antropogénicas al problema de la contaminación atmosférica a escala regional sea predominante.

Algunos de los principales contaminantes atmosféricos son sustancias que se encuentran de forma natural en la atmósfera. Se consideran contaminantes cuando sus concentraciones son notablemente más elevadas que en la situación normal (tabla 1.3).

Tabla 1.3. Comparación entre aires contaminantes y no contaminantes [2].

Componentes	Aire limpio	Aire contaminado
SO ₂	0.001-0.01 ppm	0.02-2 ppm
CO ₂	310-330 ppm	350-700 ppm
CO	<1 ppm	5-200 ppm
NO _x	0.001-0.01 ppm	0.01-0.5 ppm
Hidrocarburos	1 ppm	1-20 ppm
Partículas	10-20 g/m ³	70-700 g/m ³

PROCESO DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones.

El mecanismo de corrosión es de naturaleza electroquímica. El electrolito es una capa de humedad sobre la superficie del metal cuyo espesor varía desde capas muy delgadas (invisibles) hasta capas que mojan perceptiblemente el metal. La duración del proceso de corrosión depende sobre todo del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica.

Como el mecanismo de corrosión es electroquímico, su característica principal es la presencia de un proceso anódico y otro catódico, con un electrolito de resistencia óhmica determinada.

En el proceso anódico el metal se disuelve en la capa del electrolito, en la cual la concentración se eleva hasta la precipitación de un compuesto poco soluble.

En el proceso catódico, bajo la capa de humedad, la mayoría de los metales expuestos a la atmósfera se corroen por el proceso de reducción de oxígeno.

La resistencia óhmica entre las zonas anódica y catódica de las minúsculas pilas de corrosión que se distribuyen sobre el metal es grande cuando el espesor de la capa de humedad es pequeño.

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

- a) Corrosión seca. Se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa.
- b) Corrosión húmeda. Requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%.
- c) Corrosión por mojado. Se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua.

1.2 FACTORES QUE AFECTAN LOS PROCESOS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La acción conjunta de los factores de contaminación y los meteorológicos determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos, y cuando actúan simultáneamente, aumentan sus efectos. También es importante mencionar otros factores como las condiciones de exposición, la composición del metal y las propiedades del óxido formado, que combinados entre sí influyen en los procesos de corrosión.

Los factores que impactan en la concentración de contaminantes y que estos a su vez influyen en la corrosión atmosférica son:

- La existencia de vientos y su velocidad.
- La estabilidad o inestabilidad de una atmósfera.
- La topografía del terreno, pues puede beneficiar o perjudicar la existencia del viento.
- La intensidad de la luz solar.
- La humedad del aire (aumenta la contaminación), sabiendo que las lluvias eliminan las partículas sólidas en suspensión de los aerosoles.
- Las inversiones de temperaturas sobre todo a partir de una capa de aire a más o menos altura.

Esta última razón condiciona el que una chimenea sea de mayor o menor altitud, hay que construirlas de manera que los humos salgan y no se queden detenidos por las capas de aire donde se produce una inversión de temperaturas. Si la altura de una chimenea no es la adecuada, se tiende a dar el fenómeno indicado de quedar los gases y humos *atrapados* entre las capas, todo ello conocido como *smogs*.

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LOS PROCESOS DE CORROSIÓN

La característica atmosférica más importante que se relaciona directamente con el proceso de corrosión es la humedad, que es el origen del electrolito necesario en el proceso electroquímico.

La figura 1.1 muestra la relación que existe entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica. Se observa que en espesores pequeños la corrosión no existe, pues la resistencia óhmica de la capa del electrolito sobre la superficie metálica es muy grande y la disolución del metal es difícil. Al aumentar el espesor disminuyen la resistencia de la capa del electrolito y la polarización catódica, lo que origina un aumento en la velocidad de corrosión hasta que alcanza un nivel máximo, que disminuye después con el aumento del espesor. En esta zona, la reacción catódica es determinante en el proceso de corrosión; el factor óhmico y la polarización anódica pierden importancia, pues la difusión de oxígeno en la superficie metálica es muy lenta y por tanto determinante del proceso global.

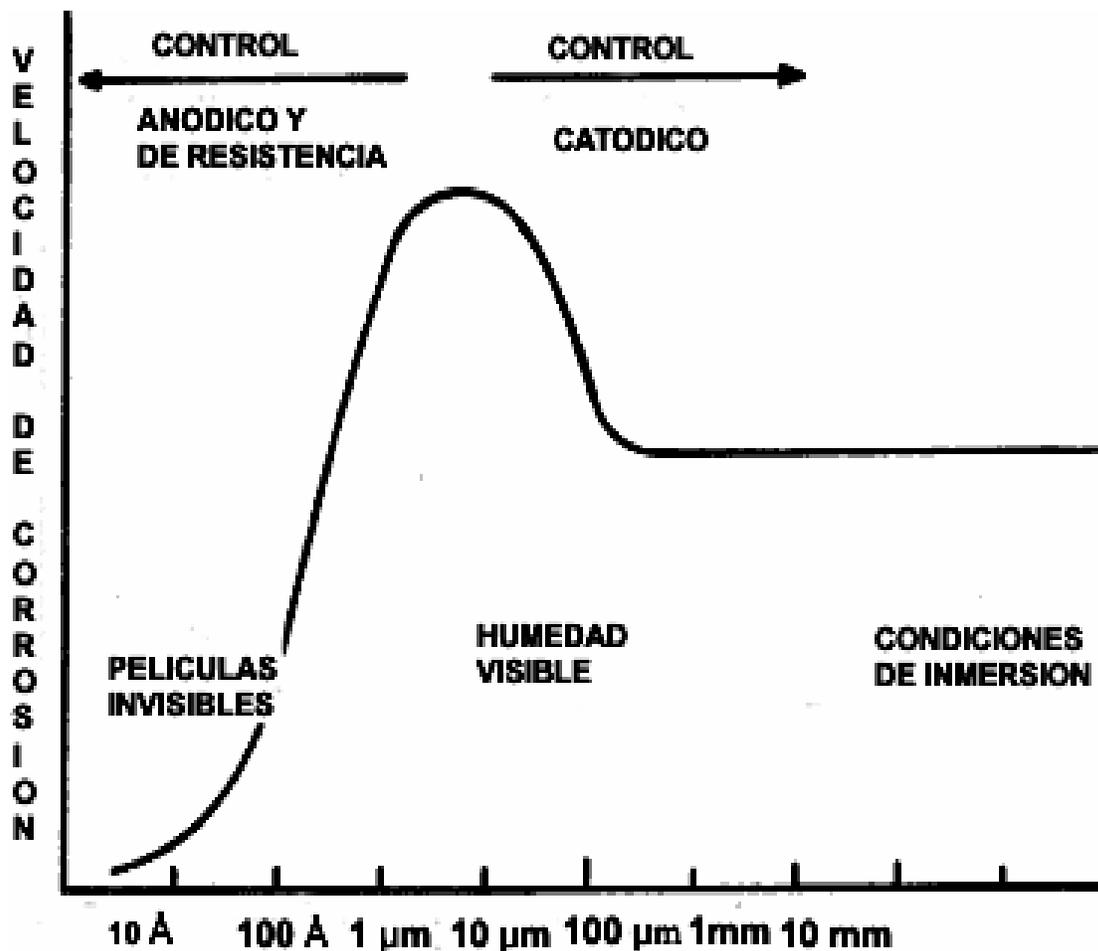


Figura 1.1. Influencia del espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión [3].

Esto permite comprobar la importancia del conocimiento de las causas y los factores que influyen en la formación de películas de humedad sobre la superficie metálica. La causa más importante es la precipitación atmosférica (en forma de lluvia o niebla espesa).

Existe también la condensación de humedad, que se origina cuando la humedad relativa de la atmósfera sobrepasa el 100%. Es importante mencionar también la condensación por adsorción, la capilar y la química.

INFLUENCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOS PROCESOS DE CORROSIÓN

Cuando se alcanza el nivel de humedad necesario para la formación de pilas de corrosión, comienza a ser importante un segundo factor: la contaminación atmosférica.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Se puede definir la contaminación atmosférica como "la presencia en el aire de sustancias extrañas, sean éstas gaseosas, sólidas o la combinación de ambas, en cantidad y durante un tiempo de permanencia que puede provocar efectos nocivos para la salud humana y un deterioro de los bienes de uso y del ambiente"

En relación a su toxicidad, los contaminantes producen efectos nocivos en el ser humano y su medio ambiente, como irritación en los ojos, nariz y garganta. Además, atacan a muchos metales y materiales de construcción, deterioran equipo eléctrico, superficies pintadas, etcétera.

Los contaminantes atmosféricos de mayor importancia son: partículas suspendidas, ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.

Los agentes contaminantes inorgánicos son generados por los vehículos y las industrias; los orgánicos, por los basureros. Las centrales termoeléctricas, las refinerías y las fábricas de papel contribuyen con el 85% del SO₂ en la atmósfera; los automóviles con un 95% de CO, en el caso de la ciudad de México (Margarita Ocampo, "Inversión térmica y contaminación", *Información Científica y Tecnológica* [4].

Esto implica, por consiguiente, la necesidad de medir la cantidad de los distintos contaminantes dispersados dentro de la capa de aire. Lo anterior puede lograrse usando equipo adecuado o mediante el uso de los modelos de difusión de gases contaminantes.

La concentración de los contaminantes se mide en partes por millón (ppm o mg/m³) o en microgramos por metro cúbico (µg/m³). Cada contaminante tiene un tiempo específico de exposición.

En la zona metropolitana de la ciudad de México existe un conjunto de estaciones automáticas llamado Red Automática de Monitoreo Atmosférico del Valle de México, en el que se incluyen varios aparatos, tanto meteorológicos como para medir diferentes contaminantes. Las estaciones están ubicadas donde se espera que se produzcan los índices más altos de contaminación. Cabe mencionar que la concentración de los contaminantes varía de acuerdo con la zona de exposición y con el avance del día.

En estas estaciones se analizan cinco de los contaminantes para los que existen normas de calidad bien establecidas en Estados Unidos y Canadá. Estos son: dióxido de azufre, monóxido de carbono, ozono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y finas e hidrocarburos.

CONTAMINANTES EMITIDOS POR LOS VEHÍCULOS AUTOMÓVILES

En las últimas décadas, el automóvil ha aparecido de forma masiva en las ciudades, contribuyendo a incrementar los problemas de contaminación atmosférica como consecuencia de los gases contaminantes que se emiten por los tubos de escape. Los principales contaminantes lanzados por los automóviles son: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC), y compuestos de plomo.

No todos los vehículos emiten los distintos tipos de contaminantes en las mismas proporciones; éstas dependerán del tipo de motor que se utilice. Los vehículos que emplean gasolina como carburante generan principalmente monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y compuestos de plomo. La emisión de este último se debe a la presencia en algunos tipos de gasolina, de tetraetilo de plomo, aditivo que se añade para aumentar su índice de octano.

Los principales contaminantes emitidos por los vehículos que utilizan motores de ciclo diésel (por ejemplo camiones y autobuses) son partículas sólidas en forma de hollín que da lugar a los humos negros, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso procedente del azufre contenido en el combustible.

CALEFACCIONES DOMÉSTICAS

Las instalaciones de calefacción domésticas son una de las principales fuentes de contaminación atmosférica de las grandes ciudades. Este tipo de focos puede contribuir con un 20 a 30% de las emisiones totales a la atmósfera en áreas urbanas. Los principales contaminantes producidos dependen del tipo de combustible empleado.

En el caso del carbón los principales contaminantes producidos son: anhídrido sulfuroso, cenizas volátiles, hollines, metales pesados y óxidos de nitrógeno. Cuando el combustible empleado es líquido (gasóleo o gasoil), los principales contaminantes emitidos son: SO₂, SO₃, NO_x, hidrocarburos volátiles no quemados y partículas carbonosas.

El gas natural es el combustible más limpio de los actualmente disponibles para calefacción, siendo su producción de contaminantes despreciable respecto a los otros combustibles. A la introducción masiva del gas para calefacciones domésticas, sustituyendo al carbón y al gasoil anteriormente utilizado, se debe en gran parte el éxito del Plan de Descontaminación Atmosférica de la ciudad de Londres.

Entre las distintas fuentes de contaminación atmosférica de origen industrial, la combustión de combustibles fósiles para la generación de calor y electricidad ocupa un lugar preponderante, tanto por la cantidad como por los tipos de contaminantes emitidos. Especial atención merecen las centrales térmicas de producción de electricidad.

Los combustibles utilizados por este tipo de instalaciones son el carbón y el fuel-oil. La producción de contaminantes depende en gran medida de la calidad del combustible, en especial de las proporciones de azufre y cenizas contenidas en el mismo y del tipo de proceso de combustión empleado.

Durante el proceso de combustión se libera a la atmósfera el azufre contenido en el combustible en forma de anhídrido sulfuroso. Junto con otros contaminantes como óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, metales pesados y una gran variedad de sustancias. Cuando se utiliza como combustible el carbón, se emiten abundantes partículas finas que pueden ser trasladadas a grandes distancias.

CONTAMINANTES EMITIDOS POR LA INDUSTRIA

La contaminación de origen industrial se caracteriza por la gran cantidad de contaminantes producidos en las distintas fases de los procesos industriales y por la variedad de los mismos. Por otra parte, en los focos de emisión industriales se suelen combinar las emisiones puntuales, fácilmente controlables, con emisiones difusas de difícil control

Los tipos de contaminantes producidos por los focos industriales dependen fundamentalmente del tipo del proceso de producción empleado, de la tecnología utilizada y de las materias primas usadas. Las actividades industriales que producen contaminantes atmosféricos son muy variadas, pero los principales focos están en los procesos productivos utilizados en las industrias básicas.

Entre los sectores que dan lugar a la mayor emisión de contaminantes atmosféricos se pueden destacar:

- La siderurgia integral. Produce todo tipo de contaminantes y en cantidades importantes, siendo los principales: partículas, SO_x, CO, NO_x, fluoruros y humos rojos (óxidos de hierro).
- Refinerías de petróleo. Producen principalmente: SO_x, HC, CO, NO_x, amoniaco, humos y partículas.
- Industria química produce, dependiendo del tipo de proceso empleado: SO₂, nieblas de ácidos sulfúrico, nítrico y fosfórico y da lugar a la producción de olores desagradables.
- Industrias básicas del aluminio y derivados del fluor. Producen emisiones de contaminantes derivados del flúor.

1.3 PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

A). ÓXIDOS DE CARBONO

Incluyen el dióxido de carbono (CO₂) y el monóxido de carbono (CO). Que son los dos son contaminantes primarios del oxido de carbono.

DIÓXIDO DE CARBONO

Características.- Es un gas sin color, olor ni sabor que se encuentra presente en la atmósfera de forma natural, no es tóxico. Desempeña un importante papel en el ciclo del carbono en la naturaleza y enormes cantidades, del orden de 10^{12} toneladas, pasan por el ciclo natural del carbono, en el proceso de fotosíntesis.

Posiblemente perjudicial para la salud en concentraciones superiores a 5000 ppm en 2-8 hr; los niveles atmosféricos se han incrementado desde unas 280 ppm hace un siglo a más de 350 ppm en la actualidad.

Acción contaminante.- Dada su presencia natural en la atmósfera y su falta de toxicidad, no se debería considerar una sustancia que contamina, pero se dan dos circunstancias que lo hacen un contaminante de gran importancia en la actualidad

- Es un gas que produce un importante efecto de atrapamiento del calor, el llamado efecto invernadero.
- Su concentración está aumentando en los últimos decenios por la quema de los combustibles fósiles y de grandes extensiones de bosques .

MONÓXIDO DE CARBONO

Es un gas sin color, olor ni sabor. Es un contaminante primario, es tóxico porque envenena la sangre impidiendo el transporte de oxígeno. Se combina fuertemente con la hemoglobina de la sangre y reduce drásticamente la capacidad de la sangre de transportar oxígeno. Es responsable de la muerte de muchas personas en minas de carbón, incendios y lugares cerrados (garajes, habitaciones con braseros, etc.)

Alrededor del 90% del que existe en la atmósfera se forma de manera natural, en la oxidación de metano (CH_4) en reacciones fotoquímicas. Se va eliminando por su oxidación a CO_2 .

La actividad humana lo genera en grandes cantidades siendo, después del CO_2 , el contaminante emitido en mayor cantidad a la atmósfera por causas no naturales. Procede, principalmente, de la combustión incompleta de la gasolina y el gasoil en los motores de los vehículos y de algunos procesos industriales. Máximo permitido: 10 mg/m³ (9 ppm) en 8 hr; 40 mg/m³ en 1 hr (35 ppm).

B). ÓXIDOS DE AZUFRE

Incluyen el dióxido de azufre (SO_2) y el trióxido de azufre (SO_3).

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

Importante contaminante primario, es un gas incoloro y no inflamable, de olor fuerte e irritante, su vida media en la atmósfera es corta, de unos 2 a 4 días. Casi la mitad vuelve a depositarse en la superficie húmeda o seca y el resto se convierte en iones sulfato

(SO_4^{2-}). Por este motivo, como se ve con detalle en la sección correspondiente, es un importante factor en la lluvia ácida.

En conjunto, más de la mitad del que llega a la atmósfera es emitido por actividades humanas, sobre todo por la combustión de carbón y petróleo (son utilizadas en las plantas generadoras del calor y electricidad; en las cuales se maneja contenidos de sulfuros), y por la industria metalúrgica.

Máximo permitido: $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,03 ppm) en un año; $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 hr (0,14 ppm).

Otra fuente muy importante es la oxidación del H_2S ; y, en la naturaleza, es emitido en la actividad volcánica. En algunas áreas industrializadas hasta el 90% del emitido a la atmósfera procede de las actividades humanas, aunque en los últimos años está disminuyendo su emisión en muchos lugares gracias a las medidas adoptadas.

En la región de España [3] sus emisiones se concentran en Galicia y Aragón, al estar situadas en estas Comunidades importantes instalaciones productoras de electricidad que usan combustibles de baja calidad. En los últimos años se están produciendo importantes disminuciones en la emisión de este contaminante (de 1980 a 1990 su producción ha disminuido en un 33%) como consecuencia de estar sustituyéndose los carbones españoles (de baja calidad) por combustibles de importación, más limpios. De todas formas las cantidades producidas siguen siendo bastante grandes y, de hecho, es el contaminante primario emitido en mayor cantidad después del CO.

TRIÓXIDO DE AZUFRE (SO_3)

Contaminante secundario que se forma cuando el SO_2 reacciona con el oxígeno en la atmósfera. Posteriormente este gas reacciona con el agua formando ácido sulfúrico con lo que contribuye de forma muy importante a la lluvia ácida y produce daños importantes en la salud, la reproducción de peces y anfibios, la corrosión de metales y la destrucción de monumentos y construcciones de piedra, como se vera más adelante.

OTROS

Algunos otros gases como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) son contaminantes primarios, pero normalmente sus bajos niveles de emisión hacen que no alcancen concentraciones dañinas.

C). ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Incluyen el óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nitroso (N_2O).

NO_x (CONJUNTO DE NO Y NO_2)

El óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) se suelen considerar en conjunto con la denominación de NO_x . Son contaminantes primarios de mucha trascendencia en los problemas de contaminación.

El emitido en más cantidad es el NO, pero sufre una rápida oxidación a NO₂, siendo este el que predomina en la atmósfera. NO_x tiene una vida corta y se oxida rápidamente a NO₃⁻ en forma de aerosol o a HNO₃ (ácido nítrico). Tiene una gran trascendencia en la formación del smog fotoquímico, del nitrato de peroxiacetilo (PAN) e influye en las reacciones de formación y destrucción del ozono, tanto troposférico como estratosférico, así como en el fenómeno de la lluvia ácida. En concentraciones altas produce daños a la salud y a las plantas, corroe tejidos y materiales diversos. Las actividades humanas que los producen son, principalmente, las combustiones realizadas a altas temperaturas. Más de la mitad de los gases de este grupo emitidos en España proceden del transporte.

Máximo permitido: 100 µg/m³ (0,05 ppm) en un año para el NO₂; reacciona con hidrocarburos y luz solar para formar oxidantes fotoquímicos

ÓXIDO NITROSO (N₂O)

En la troposfera es inerte y su vida media es de unos 170 años. Va desapareciendo en la estratosfera en reacciones fotoquímicas que pueden tener influencia en la destrucción de la capa de ozono. También tiene efecto invernadero. Procede fundamentalmente de emisiones naturales (procesos microbiológicos en el suelo y en los océanos) y menos de actividades agrícolas y ganaderas (alrededor del 10% del total).

OTROS

Algunos otros gases como el amoníaco (NH₃) son contaminantes primarios, pero normalmente sus bajos niveles de emisión hacen que no alcancen concentraciones dañinas. El amoníaco que se emite a la atmósfera en España se origina casi exclusivamente en el sector agrícola y ganadero.

D). COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Este grupo incluye diferentes compuestos como el metano CH₄, los clorofluorocarburos (CFC) y otros.

METANO (CH₄)

Es el más abundante y más importante de los hidrocarburos atmosféricos, es un contaminante primario que se forma de manera natural en diversas reacciones anaeróbicas del metabolismo. El ganado, las reacciones de putrefacción y la digestión de las termitas forman metano en grandes cantidades. También se desprende del gas natural, del que es un componente mayoritario y en algunas combustiones. Asimismo se forman grandes cantidades de metano en los procesos de origen humano hasta constituir, según algunos autores, cerca del 50% del emitido a la atmósfera.

Desaparece de la atmósfera a consecuencia, principalmente, de reaccionar con los radicales (OH) formando, entre otros compuestos, ozono. Su vida media en la troposfera es de entre 5 y 10 años.

Se considera que no produce daños en la salud ni en los seres vivos, pero influye de forma significativa en el efecto invernadero y también en las reacciones estratosféricas. En España la gran mayoría del metano emitido a la atmósfera procede de cuatro fuentes, en proporciones muy similares: la agricultura y ganadería, el tratamiento de residuos, el tratamiento y distribución de combustibles fósiles y las emisiones naturales que tienen lugar, sobre todo, en las zonas húmedas.

OTROS HIDROCARBUROS

En la atmósfera están presentes muchos otros hidrocarburos, principalmente procedentes de fenómenos naturales, pero también originados por actividades humanas, sobre todo las relacionadas con la extracción, la refinación y el uso del petróleo y sus derivados. Sus efectos sobre la salud son variables. Algunos no parece que causen ningún daño, pero otros, en los lugares en los que están en concentraciones especialmente altas, afectan al sistema respiratorio y podrían causar cáncer. Intervienen de forma importante en las reacciones que originan el *smog* fotoquímico.

En España las emisiones de este tipo de compuestos proceden de procesos naturales que tienen lugar en los bosques (el 30%, aproximadamente), y del transporte por carretera (25%).

COLORFLUOROCARBUROS (CFC)

Son especialmente importantes por su papel en la destrucción del ozono en las capas altas de la atmósfera.

E). PARTÍCULAS Y AEROSOLES

En la atmósfera permanecen suspendidas sustancias muy distintas como partículas de polvo, polen, hollín (carbón), metales (plomo, cadmio), asbesto, sales, pequeñas gotas de ácido sulfúrico, dioxinas, pesticidas, etc. Se suele usar la palabra aerosol para referirse a los materiales muy pequeños, sólidos o líquidos. Partículas se suele llamar a los sólidos que forman parte del aerosol, mientras que se suele llamar polvo a la materia sólida de tamaño un poco mayor (de 20 micras o más). El polvo suele ser un problema de interés local, mientras que los aerosoles pueden ser transportados muy largas distancias.

Según su tamaño pueden permanecer suspendidas en la atmósfera desde uno o dos días, las de 10 micrómetros o más, hasta varios días o semanas, las más pequeñas. Algunas de estas partículas son especialmente tóxicas para los humanos y, en la práctica, los principales riesgos para la salud humana por la contaminación del aire provienen de este tipo de polución, especialmente abundante en las ciudades.

AEROSOLES PRIMARIOS

Los aerosoles emitidos a la atmósfera directamente desde la superficie del planeta proceden principalmente, de los volcanes, la superficie oceánica, los incendios forestales, polvo del suelo, origen biológico (polen, hongos y bacterias) y actividades humanas.

AEROSOLES SECUNDARIOS

Los aerosoles secundarios se forman en la atmósfera por diversas reacciones químicas que afectan a gases, otros aerosoles, humedad, etc. Suelen crecer rápidamente a partir de un núcleo inicial.

Entre los aerosoles secundarios más abundantes están los iones sulfato alrededor de la mitad de los cuales tienen su origen en emisiones producidas por la actividad humana. Otro componente importante de la fracción de aerosoles secundarios son los iones nitrato.

La mayor parte de los aerosoles emitidos por la actividad humana se forman en el hemisferio Norte y como no se expanden por toda la atmósfera tan rápido como los gases, sobre todo porque su tiempo de permanencia medio en la atmósfera no suele ser mayor de tres días, tienden a permanecer cerca de sus lugares de producción.

F). OXIDANTES

En este grupo se encuentran tres tipos de ozonos los cuales son; el ozono (O_3), el Ozono estratosférico y el ozono troposférico.

OZONO (O_3)

El ozono (O_3) protege de las radiaciones ultravioletas, que son todas aquellas con longitudes de onda entre los 10 y 400 nm (situadas más allá del extremo violeta del visible), encargándose de no dejar pasar estas radiaciones provenientes del sol, gracias a la concentración que existe en lo que denominamos la estratosfera, a unas alturas de 12 y 40 Km. sobre la superficie terrestre.

El ozono es la sustancia principal en este grupo, aunque también otros compuestos actúan como oxidantes en la atmósfera.

El ozono, O_3 , es una molécula formada por átomos de oxígeno. Se diferencia del oxígeno molecular normal en que este último es O_2 .

El ozono es un gas de color azulado que tiene un fuerte olor muy característico que se suele notar después de las descargas eléctricas de las tormentas. De hecho, una de las maneras más eficaces de formar ozono a partir de oxígeno, es sometiendo a este último a potentes descargas eléctricas.

Se forman en la atmósfera como reacción a los óxidos de nitrógenos, hidrocarburos y luz solar

Es una sustancia que cumple dos papeles totalmente distintos según se encuentre en la estratosfera o en la troposfera.

Máximo permitido: 235 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,12 ppm) en 1 hr.

OZONO ESTRATOSFÉRICO

El que está en la estratosfera (de 10 a 50 km.) es imprescindible para que la vida se mantenga en la superficie del planeta porque absorbe las letales radiaciones ultravioletas que llegan del sol.

OZONO TROPOSFÉRICO

Existe ozono a nivel del suelo, es conocido como troposférico, tiene un origen natural y en gran parte proviene de procesos industriales, como es la combustión de carbón al producir los nocivos óxidos de nitrógeno de los que deriva.

Pero este ozono se divide en tres para su propio estudio; el primero de ellos es el ozono que se encuentra en la troposfera, junto a la superficie de la Tierra (en la parte más baja de la superficie terrestre), es un importante contaminante secundario. El segundo de ellos es el que se encuentra en la zona más cercana a la superficie terrestre (en la parte media) y se forma por reacciones inducidas por la luz solar en las que participan, principalmente, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos presentes en el aire. Es el componente más dañino del *smog* fotoquímico y causa daños importantes a la salud, cuando está en concentraciones altas, y frena el crecimiento de las plantas y los árboles. El tercero de ellos se encuentra en la parte alta de la troposfera (en la parte superior de la superficie terrestre) y suele entrar el ozono procedente de la estratosfera, aunque su cantidad y su importancia son menores que el de la parte media y baja de la troposfera.

En España, como en otros países mediterráneos, durante el verano se dan condiciones meteorológicas favorables para la formación de ozono: altas temperaturas, cielos despejados, elevada insolación y vientos bajos, especialmente en la costa mediterránea y sur de la Península. En bastantes ocasiones a lo largo del año se suelen superar, en numerosas estaciones de control, los umbrales marcados por la Directiva de la Unión Europea de protección a la salud, de protección a la vegetación y los de información a la población; pero no suele haber episodios de superación del umbral de alerta, a diferencia de otras zonas de Europa o Estados Unidos en los que no son raros.

1.4 PRINCIPALES CONTAMINANTES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

El NaCl y el SO₂ son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. La correlación entre los niveles de concentración de SO₂ o NaCl y la velocidad de corrosión es alta, como se muestra en la figura 1.2. También es importante mencionar al sulfuro de hidrógeno, que es el responsable del deslustre de cobre y plata, los compuestos nitrogenados que en solución incrementan la humedad en la superficie de los metales, las partículas inertes (silicio) y las partículas absorbentes (carbón de leña).

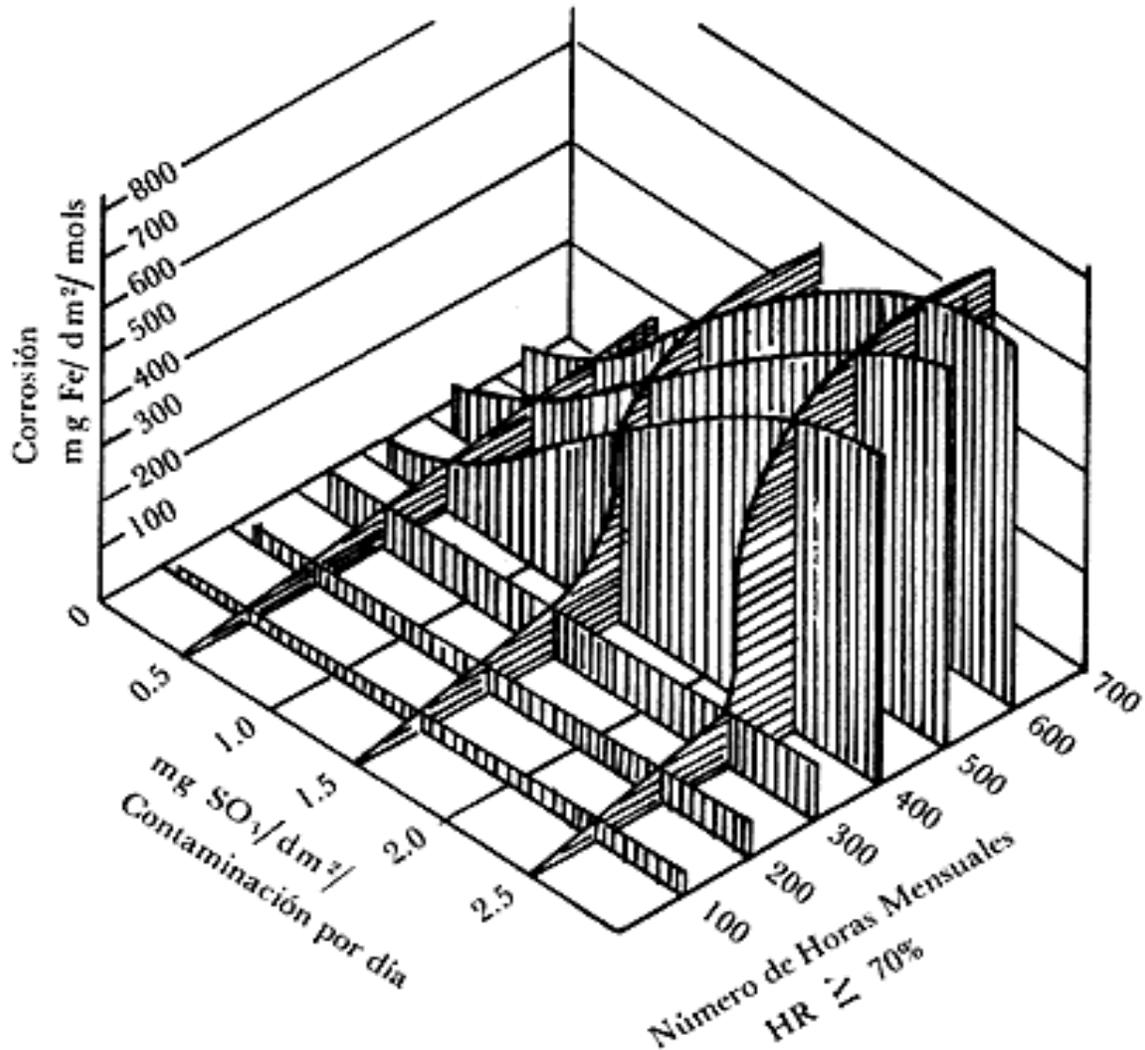


Fig. 1.2. Relación de la velocidad de corrosión del hierro con la contaminación y la humedad atmosférica [3].

Entre todos estos contaminantes, el SO_2 tiene una importancia especial en los procesos de corrosión atmosférica, a causa de su incidencia directa en la velocidad de corrosión de los metales expuestos a la atmósfera.

Los metales no ferrosos consumen SO_2 en las reacciones de corrosión, y sus productos principales son los sulfatos metálicos, mientras que en la oxidación del hierro y del acero los sulfatos ferrosos son hidrolizados formando óxidos y generando ácido sulfúrico.

Una característica importante del SO_2 es que es más soluble que el oxígeno, lo cual origina que cuando se producen concentraciones muy bajas en la atmósfera pueden obtenerse películas de humedad sobre la superficie metálica con altas concentraciones de SO_2 , lo cual ocasiona el deterioro de la misma. Esto tiene una gran importancia, ya que estudios atmosféricos basados en técnicas de química analítica y en computadoras de alto poder resolutivo han llegado a la conclusión de que la composición de la

atmósfera se ha convertido en un reservorio de gran cantidad de trazas de especies gaseosas.

A pesar de las bajas concentraciones en que se encuentran estas sustancias, frecuentemente representan un riesgo para la vida de plantas y animales, pueden alterar el clima y constituyen una aportación muy importante a los fenómenos de corrosión.

El cálculo indica que la mayoría de estas sustancias están presentes en la atmósfera a niveles más altos de los esperados en equilibrio termodinámico con el nitrógeno, el oxígeno, el bióxido de carbono y el vapor de agua. La composición de estas trazas está controlada por una serie de mecanismos cinéticos y engloban una combinación complicada de procesos químicos, físicos y biológicos.

Las reacciones químicas entre los constituyentes mayoritarios de la troposfera son prácticamente inexistentes; en cambio, la formación de muchas especies químicas activas bajo la influencia de la luz solar produce un rápido incremento de reacciones en cadena que desempeñan un papel muy importante en la presencia de trazas en la composición de la atmósfera.

Es necesario caracterizar el flujo de fotones solares en función de la longitud de onda, con el fin de conocer cuáles serán absorbidos o disipados, en su trayectoria a través de las capas bajas de la atmósfera. Los fotones con una longitud de onda de aproximadamente 240 nm son absorbidos por las moléculas de oxígeno o de nitrógeno de la atmósfera y por el ozono, situado principalmente en la estratosfera. Así resulta que existe un filtro natural de fotones en la región espectral comprendida entre 240 y 300 nm, de manera que en la troposfera sólo es necesario considerar aquellas reacciones químicas que son activadas por fotones de longitud de onda de 300 nm o más.

Una de las principales diferencias entre la química de la troposfera y la de la estratosfera son los fotones ultravioleta, que tienen energía suficiente para romper el enlace oxígeno, (O-O). Esta reacción conduce a la formación de ozono y explica la presencia de mayores cantidades de ozono en la estratosfera que en la troposfera.

Las corrientes de convección de los vientos dominantes en las capas bajas de la atmósfera ocasionan que se produzca un cierto estancamiento en cada hemisferio, de manera que la difusión de los gases presentes en la troposfera tarda cerca de dos meses en homogeneizarse en el hemisferio sur o norte y unos dos años en hacerlo en toda la troposfera.

La gran mayoría de las especies traza que llegan a la atmósfera están en estado de fase reducida (SH_2 , NH_3 , CH_4 , etc.); en cambio, las sustancias que regresan de la atmósfera a la superficie terrestre, usualmente por dilución en las gotas de lluvia o por sedimentación, están altamente oxidadas (H_2SO_4 , HNO_3 , CO_2 , etc.). El escalón entre estas especies reducidas y las oxidadas lo constituyen las reacciones fotoquímicas atmosféricas, dando lugar de esta manera a un ciclo en el cual los gases reducidos son incorporados a la atmósfera, se oxidan foto químicamente y regresan a la superficie terrestre.

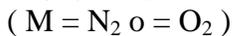
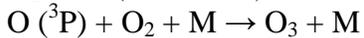
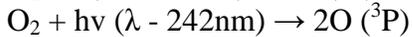
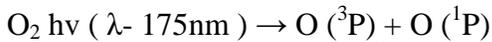
1.5 CICLO ATMOSFÉRICO DEL AZUFRE Y EL NITRÓGENO

RADICALES LIBRES

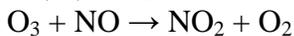
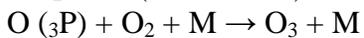
Antes de describir el ciclo del azufre y el nitrógeno, se presenta una breve noción de la formación de radicales libres, la causa principal de las oxidaciones en la atmósfera.

Estas especies químicas tienen un electrón no apareado en la capa exterior y esto les da afinidad para adicionar un segundo electrón, el que las hace actuar como oxidantes poderosos en las pequeñas concentraciones en que se encuentran. De todos los radicales libres presentes en la atmósfera, el hidroxilo parece ser el de mayor incidencia.

La producción del radical hidroxilo se inicia con la fotólisis del ozono. En la atmósfera superior; el ozono se forma principalmente por acción de la radiación solar sobre el oxígeno molecular:



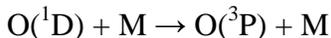
En la atmósfera inferior, los procesos productores de ozono implican la absorción de radiaciones solares por el dióxido de nitrógeno:



Cuando el ozono absorbe un fotón en las proximidades del ultravioleta, con una longitud de onda menor a 315 nm, se produce un átomo de oxígeno eléctricamente excitado:

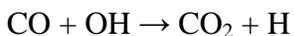


La transición $\text{O} (^1\text{D}) \rightarrow \text{O} (^3\text{P})$ no es fácil y el átomo de oxígeno excitado, $\text{O} (^1\text{D})$, tiene tiempo de vida relativamente largo, unos 110 s. En las capas más bajas de la atmósfera puede dar lugar a dos reacciones:



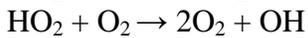
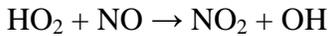
Esta segunda reacción es la fuente principal de radicales hidroxilo en la troposfera.

Los radicales de hidroxilo frecuentemente reaccionan con monóxido de carbono o metano:

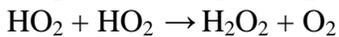
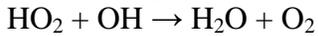


los radicales hidrógeno y metil formados se combinan rápidamente con oxígeno molecular formando radicales hidroperoxil (HO_2) y metilperoxil (CH_3O_2).

El radical hidroperoxil puede regenerar OH



aunque también puede llegar a la formación de agua y peróxido de hidrógeno que son arrastrados por la lluvia:

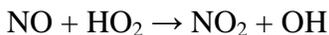


La química del radical hidroperoxil es mucho más compleja y parece ser que por oxidación conduce a la producción de monóxido de carbono, CO.

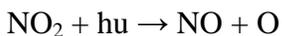
CICLO ATMOSFÉRICO DEL NITRÓGENO

Los principales compuestos de nitrógeno presentes en la atmósfera son las formas oxidadas NO, NO_2 y HNO_3 , que están relacionadas químicamente entre sí por una serie de reacciones cíclicas.

La fuente principal de óxido de nitrógeno atmosférico es la reacción entre el oxígeno y el nitrógeno del aire empleado en procesos de combustión a temperaturas elevadas, el cual es oxidado rápidamente a dióxido, principalmente en presencia de iones hidroperoxil:

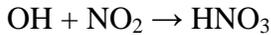


Esta reacción no sólo regenera el radical hidroxilo a partir del hidroperoxil, sino que también conduce a la formación de ozono:

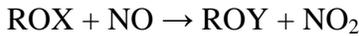


Como se ha descrito anteriormente, el NO reacciona también con el ozono para formar NO_2 , y así como el CO produce una disminución del radical OH, el NO ocasiona un aumento de este radical con la correspondiente potenciación de la acción oxidante del medio.

Las mediciones de las especies oxidadas del nitrógeno NO, NO_2 y HNO_3 indican que la distribución troposferita de las mismas no es afectada fuertemente por focos urbanos, como sucede con el CO. La razón de esta aparente diferencia es la velocidad relativamente rápida a la cual los óxidos de nitrógeno son eliminados a la atmósfera. Después de la emisión a la atmósfera, el NO pasa rápidamente a NO_2 , según las reacciones descritas. El NO_2 reacciona con el radical OH y forma HNO_3 , el cual es altamente soluble y se elimina fácilmente con la lluvia.

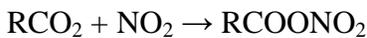


Cuando no hay hidrocarburos en la atmósfera, el ozono reacciona con el NO para formar NO₂ y las cantidades de O₃ no son significativas. Más en presencia de radicales orgánicos oxigenados y minerales, el NO se oxida rápidamente a NO₂:



por lo que el ozono se acumula en el ambiente atmosférico. Los productos de la reacción forman una mezcla compleja de sustancias, en la cual el ozono se encuentra en gran abundancia.

Por reacción del dióxido de nitrógeno con radicales acilperoxil se pueden formar cantidades menos importantes de sustancias como el nitrato de peroxiacetil (PAN):



Un producto que se ha podido identificar en cámaras de smog y que se ha caracterizado como muy estable es el perácido nítrico (HO₂NO₂).

En definitiva, se puede decir que el ácido nítrico se forma en la atmósfera por oxidación del dióxido de nitrógeno, principalmente por reacción con el radical hidroxil:



La presión de vapor del ácido nítrico es alta, de manera que no se condensa en cantidades apreciables y permanece en fase gaseosa. La reacción con el amoníaco produce la formación de nitrato de amonio sólido, a humedades relativas del orden de 62%, dando lugar a la formación de aerosoles (figura 1.3):

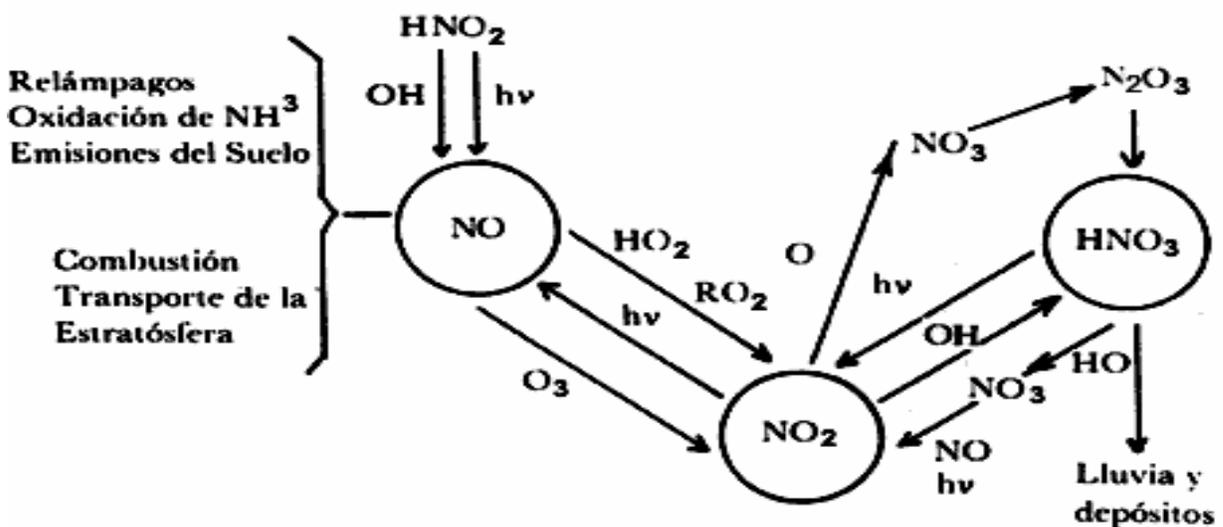
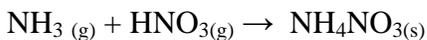


Figura 1.3. Ciclo atmosférico del nitrógeno [3].

El equilibrio de esta reacción, que depende de la temperatura constituye el proceso de conversión de gas a partículas por la formación de aerosol de nitrato.

CICLO ATMOSFÉRICO DEL AZUFRE

El hecho de que la presencia de compuestos de azufre reduzca la calidad del aire y aumente la acidez del agua de lluvia ha provocado un aumento del interés en el conocimiento del ciclo atmosférico del azufre, y aun cuando la química atmosférica de este elemento es complicada y no se conoce a fondo, sí se ha logrado identificar la mayor parte de los compuestos correspondientes.

El principal compuesto de azufre presente en la atmósfera es el dióxido, el cual puede ser introducido directamente a partir de los procesos de combustión de combustibles fósiles o puede provenir de la oxidación de las formas reducidas del azufre, procedentes principalmente de procesos biogénicos (CS_2 , CH_3SCH_3 , CH_3SSCH_3 , H_2S , etc.). El proceso final es la conversión de SO_2 en ácido sulfúrico y la incorporación de este ácido a las gotas de niebla y a los aerosoles (figura 1.4).

Esta oxidación puede ser iniciada por la reacción en fase gaseosa del dióxido de azufre con el radical hidroxilo, por las reacciones en fase líquida en las gotas de niebla, que incluyen el dióxido de azufre disuelto y agentes oxidantes tales como peróxido de hidrógeno o el ozono, o por reacciones en las superficies sólidas de los aerosoles. La separación de los aerosoles y gotas de niebla que contienen H_2SO_4 en forma de precipitaciones devuelven el azufre a la superficie de la Tierra y cierra el ciclo del azufre atmosférico.

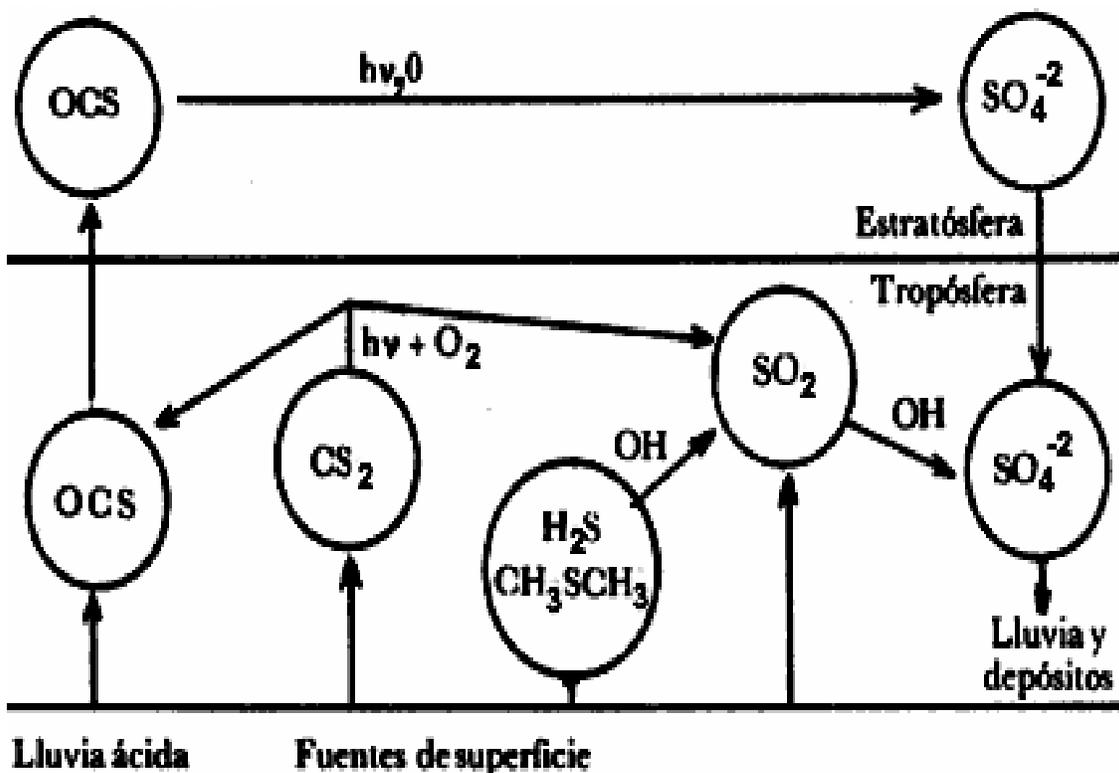


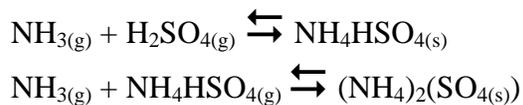
Figura 1.4. Ciclo atmosférico del azufre [3].

La reacción más importante de oxidación en fase gaseosa del SO₂ atmosférico es la de este producto con radicales libres como el hidroxilo, el hidroperoxilo y el metilperoxilo. Parece ser que, entre todos estos radicales, el hidroxilo es el principal responsable de esta oxidación:



El ácido formado tiene una presión de vapor baja y se condensa fácilmente en presencia de H₂O.

De la misma manera que el ácido nítrico, también el ácido sulfúrico puede dar lugar a un proceso de transformación de gas a partículas sólidas por reacción, principalmente, con el amoníaco presente en la atmósfera:



La composición química del aerosol se caracteriza por las fracciones molares de los componentes NH₄ HSO₄ y (NH₄)₂SO₄, que se pueden calcular si se conocen las concentraciones iniciales en fase gaseosa de los compuestos NH₃ y H₂SO₄.

Se puede representar el mecanismo del ciclo del azufre con el esquema de la figura 1.4.

LLUVIA ÁCIDA

La oxidación del dióxido de azufre y la incorporación de ácido sulfúrico en las gotas de niebla pueden aumentar la acidez de las precipitaciones de la misma forma en que lo hacen la oxidación y la separación de los óxidos de nitrógeno, de manera que las regiones con altos niveles de óxidos de azufre y de nitrógeno tienen con cierta frecuencia lluvias ácidas.

La lluvia normal, no contaminada, tiene un pH de aproximadamente 5.6, acidez debida a la presencia de ácido carbónico, formado en la atmósfera por combinación del bióxido de carbono y el agua.

La lluvia ácida se caracteriza por un pH inferior a 5.6 y contiene pequeñas pero significativas cantidades de ácido sulfúrico y ácido nítrico.

En definitiva, se puede decir que las deposiciones atmosféricas sobre la superficie terrestre se pueden producir en forma de gas, partículas, aerosoles y precipitaciones. Sus efectos sobre el ecosistema terrestre son muy importantes, y uno de los más agresivos es el de la corrosión de los metales.

1.6 MAPAS DE CORROSIVIDAD ATMOSFERICA

La trascendencia del fenómeno de corrosión justifica la búsqueda continua de relaciones, empíricas o teóricas, entre velocidad de corrosión y factores atmosféricos (meteorológicos y químicos).

Las predicciones de corrosión o agresividad de las atmósferas pueden servir como orientación respecto a las medidas protectoras que deben adoptarse para la conservación de una estructura metálica, y se tendrán en cuenta en la planificación de una obra, para especificar el metal o aleación que hay que utilizar, el tipo de recubrimiento protector y sus características —si es que se emplea alguno— y la frecuencia del mantenimiento. Así, la importancia de estos factores nos muestra el interés que tienen los mapas de corrosividad de países y áreas geográficas, que informen directamente acerca de los riesgos de corrosión.

PARA LA CONFECCIÓN DE ESTOS MAPAS ES POSIBLE UTILIZAR DOS ENFOQUES DISTINTOS:

(a) La medida directa de la corrosividad de las atmósferas por su acción sobre ciertos metales, Fe, Zn, Al y Cu, es frecuentemente.

b) Determinación del efecto de los principales parámetros en la corrosión atmosférica, con el fin de trazar el mapa de corrosividad en función de la variación geográfica de aquéllos.

Recurrir al método a obliga a disponer de una vasta red de estaciones de ensayo, que cubra prácticamente toda la superficie de un país. Hacen falta miles de estaciones de exposición. Aun así, resulta arriesgado generalizar algunas conclusiones.

Recurrir al método b exige fijar previamente la influencia de los principales parámetros en la velocidad de corrosión y conocer, además, cómo varían estos parámetros a lo largo y ancho de la geografía de un país o territorio. Se ha dicho que la corrosividad de la atmósfera está determinada fundamentalmente por el tiempo de humectación de la superficie metálica y por los niveles de contaminación ambiental. Si, como simplificación, se considera que el factor de contaminación no interviene, el mapa de corrosión pasa a ser función exclusiva del tiempo de humectación.

A partir de un mapa de este tipo, esto es, basado sólo en el tiempo de humectación, todo pronóstico requerirá, además, del conocimiento previo del tipo y grado de contaminación del lugar de exposición. Tendrá que saberse si la estructura metálica permanece expuesta a condiciones rurales (contaminación prácticamente nula) o a los efectos de contaminantes atmosféricos estimuladores de la corrosión (generalmente SO₂ y Cl-), y en qué medida. En el supuesto caso de una atmósfera contaminada, habrá que multiplicar el dato leído por el factor o coeficiente de corrección pertinente, que tome en consideración los efectos de la contaminación. Si existen industrias químicas cerca del lugar de exposición, la corrosión podrá ser excepcionalmente elevada e imprevisible a través de los mapas de corrosión y factores de corrección que tengan en cuenta, únicamente, los niveles de SO₂ y Cl. *La Construction Industry Research and Information Association (CIRIA)*, en el Reino Unido, y la Rust Oleum Corporation en Estados Unidos han empleado el método a para la elaboración de los mapas de corrosión de sus respectivos países.

El método b ha sido seguido por el Instituto de Física y Química de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, que ha trazado los mapas de corrosividad atmosférica del Fe, Zn, Al y Cu en dicho país en función de datos meteorológicos. No constituye

una gran desventaja que estos mapas no reflejen directamente la acción de factores locales de contaminación, en vista del carácter mudable de éstos (creación de nuevas industrias, desmantelamiento de otras, adopción de medidas anticontaminantes, etc.), y de su ocasionalmente muy reducido ámbito de actuación (formación de microclimas o existencia de puntos singulares). El efecto de la contaminación se introduce más tarde, por medio de coeficientes correctores de los valores de corrosión leídos sobre el mapa.

MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA DE MÉXICO

Para la elaboración del mapa de corrosividad de México se ha renunciado a la idea de calibrar de modo directo la corrosividad de las atmósferas, por exigir este planteamiento la instalación de cientos, tal vez miles de estaciones de ensayo, labor que rebasa con creces las posibilidades experimentales y económicas del equipo de investigadores con que se cuenta.

Por ello, el esfuerzo se centra en medir la corrosividad atmosférica en una serie limitada de puntos, con la esperanza de llegar a generalizaciones que permitan formarse una idea acerca de los niveles de corrosión previsibles a lo largo y ancho de toda la geografía de México.

Para el caso de la determinación de la corrosividad atmosférica en México es necesario considerar que el clima (figura 1.5) presenta notables variaciones ya que va desde el seco hasta el calido húmedo. La determinación del tipo de clima es función de la cantidad de energía solar recibida, temperatura (máximas, mínimas y promedios), humedad, precipitación, intensidad y duración de los vientos. Asimismo para México habrá que considerar la notable extensión de sus litorales (11,122km de acuerdo al INEGI), ya que si bien la mayor parte de la población se concentra en el altiplano, en la costa existen ciudades importantes, en varias de las cuales se combinan los efectos de la alta concentración de sales, típica de la costa, con la de contaminantes característicos de una intensa actividad industrial. Todo lo anterior conjugado con temperaturas anuales promedio superiores a los 18°C, situación que se traduce en prolongados tiempos de humectación y como consecuencia, elevados grados de corrosividad atmosférica.



Figura 1.5. Características de los diferentes climas que existen en la república mexicana [5].

1.7 EFECTOS SOBRE LOS MATERIALES

Cada vez se está prestando más atención, tanto por sus repercusiones económicas como por los daños irreparables que causa sobre los objetos y los monumentos de alto valor histórico-artístico, a los efectos que la contaminación atmosférica produce sobre los materiales.

La acción de los contaminantes atmosféricos sobre los materiales puede manifestarse por la sedimentación de partículas sobre la superficie de los mismos, afeando su aspecto externo, o por ataque químico al reaccionar el contaminante con el material. Los SO_x causan daños a muchos tipos de materiales, bien directa o indirectamente. Un alto contenido de SO_x en el aire produce la aceleración de la corrosión de los metales tales como el acero al carbono, zinc, acero galvanizado, compuestos del cobre, níquel y aluminio. Esta aceleración se ve favorecida por la presencia de partículas depositadas por la humedad y por la temperatura.

En general, puede señalarse que la corrosividad de una atmósfera depende de condiciones meteorológicas y factores de contaminación. Se han observado correlaciones entre tasas de corrosión en metales y concentraciones de SO₂ en la atmósfera, dándose las tasas altas de corrosión más altas en zonas industrializadas. Las nieblas de ácido sulfúrico procedentes de la conversión catalítica del SO₂ a SO₃ en la atmósfera, atacan a los materiales de construcción como el mármol, la caliza y la argamasa, convirtiendo los carbonatos en sulfatos solubles en el agua de lluvia. Esto

unido a que el volumen específico de los sulfatos es mayor que el de los carbonatos, hace que en la piedra aparezcan escamas y se debilite mecánicamente.

Los compuestos de azufre pueden producir daños en pinturas plásticas, papel, fibras textiles y sobre los contactos eléctricos de los sistemas electrónicos, dando lugar a deficiencias en su funcionamiento. La acción de los oxidantes fotoquímicos se produce sobre todo en los cauchos y elastómeros en los que causan un rápido envejecimiento y agrietamiento. Los óxidos de nitrógeno decoloran y estropean las fibras textiles y los nitratos producen la corrosión de las aleaciones de cobre-níquel.

El aumento de las concentraciones de dióxido de carbono y de otros contaminantes en la atmósfera puede dar lugar a una elevación general de la temperatura del globo, por «efecto invernadero», que modificaría el régimen de lluvias, lo que produciría alteraciones sobre las tierras cultivables y la extensión de los desiertos. Por otra parte, los sulfatos y las partículas finas que disminuyen la visibilidad pueden igualmente reducir la intensidad de la radiación solar. Los hidrocarburos halogenados y los óxidos de nitrógeno emitidos por los aviones supersónicos pueden provocar una disminución de ozono en la estratosfera con el consiguiente aumento de la radiación ultravioleta que llegaría a la Tierra.

1.8 CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN INTERIORES

El conocimiento acumulado sobre corrosión en interiores es mucho menor que el correspondiente a la corrosión en exteriores. El estudio de la corrosión en interiores comenzó hace aproximadamente dos décadas, y en muchas ocasiones sus resultados se han orientado al análisis de sus efectos sobre materiales y equipo electrónicos. Rice *et al* [6, 7, 8] estudiaron en 1980 la corrosión en interiores de cobre, plata, níquel, cobalto y hierro, esto para diferentes localidades en Estados Unidos. De los resultados de sus investigaciones se desprende que en general la velocidad de corrosión es mucho menor en interiores que en exteriores, sin embargo la ventaja del efecto de lavado de las superficies que se presenta en exteriores por la acción de la lluvia puede resultar benéfica al reducir la concentración de contaminantes.

Los resultados de estudios como los de Rice deben de ser tomados con las debidas reservas para países como México, en donde el empleo de sistemas de acondicionamiento de aire es poco frecuente, además de que existe usualmente un amplio intercambio de aire entre las zonas interiores de las edificaciones y el exterior. Esto da como resultado que la composición de las atmósferas exteriores sea muy similar a las interiores, con la excepción de los efectos que la lluvia y niebla tienen sobre los fenómenos corrosivos.

Por otra parte es conveniente considerar, en el caso de contar con equipos de aire acondicionado, si éstos disponen de deshumidificadores, ya que de otra manera la humedad relativa en el interior será superior al exterior.

En interiores, la película de humedad formada sobre la superficie está supeditada a ciclos de menor variación de temperatura y de humedad. Esto significa que en

interiores los ciclos de condensado-evaporación son menos notorios y drásticos, si bien habrá que considerar que para que exista precipitación de condensado con efectos corrosivos, no es requisito alcanzar el punto de rocío.

Desde el punto de vista de materiales de construcción (elementos estructurales, ornamentales, herrería, etc.) las condiciones características de los interiores son poco agresivas, sin embargo para equipos y sistemas electrónicos si se dan las condiciones que permiten la presencia de inconvenientes en su funcionamiento y un sensible deterioro. Un ejemplo palpable de dicha situación es el equipo telefónico el cual se puede encontrar bajo cualquier condición atmosférica, y aún en condiciones de exteriores, como es el caso de los de servicio público.

Las posibles diferencias existentes en la concentración de contaminantes en interiores y exteriores se deben principalmente a la adsorción de gases y partículas en interiores y a la disminución de las variaciones atmosféricas exteriores por medio de sistemas de ventilación y la misma construcción. Como se observa en la tabla 2.10 la concentración general de contaminantes en interiores es menor que en exteriores a excepción del amoniaco (NH_3) y el formaldehído (HCHO). La mayor parte de los contaminantes encontrados en interiores proviene del exterior aunque algunos se producen dentro como productos de calefacción, partículas sólidas, contaminación de estufas y calentadores de gas, nieblas de aceites y grasas de las cocinas, humo de cigarros, descomposición de los materiales que forman pisos y paredes (tapetes, recubrimientos plásticos, etcétera), entre otros. La (tabla 1.4) solo cumple funciones de comparación, ya que las concentraciones de los contaminantes varían según el ambiente y las condiciones de la edificación (existencia de sistemas de aire acondicionado, condiciones de ventilación del interior, uso del inmueble o de la zona bajo estudio, entre otros).

Tabla 1.4. Concentración general de contaminantes en interiores y exteriores [9].

Compuesto		Concentración (ppb)	
		Exteriores	Interiores
O_3	Ozono	4 - 42	3 - 30
H_2O_2	Agua oxigenada	10 - 30	5
SO_2	Dióxido de azufre	1 - 65	0.3 - 14
H_2S	Ácido sulfhídrico	0.7 - 24	0.1 - 0.7
NO_2	Dióxido de nitrógeno	9 - 78	1 - 29
HNO_3	Ácido nítrico	1 - 10	3
NH_3	Amoniaco	7 - 16	13 - 259
HCl	Ácido clorhídrico	0.18 - 3	0.05 - 0.18
Cl_2	Cloro	0.005 - 0.08	0.001 - 0.005
HCHO	Formaldehído	4 - 15	10
HCOOH	_____	4 - 20	20

CAPÍTULO 2. DETERIORO EN EQUIPO ELECTRÓNICO POR EFECTO DEL MEDIO AMBIENTE.

2.1 ANTECEDENTES GENERALES

El equipo y dispositivos electrónicos tales como circuitos integrados, circuitos impresos, conectores, contactos, interruptores, dispositivos para el almacenamiento magnético de datos, entre otros; se pueden degradar por una variedad de efectos eléctricos, magnéticos, mecánicos y químicos. Entre las causas más importantes de la degradación química está la corrosión atmosférica.

La corrosión de partes o componentes críticos de dispositivos electrónicos puede producir un amplio espectro de consecuencias que van desde ruido en la señal, incremento en la resistencia del circuito, corrientes en cortocircuito, entre otras situaciones que se pueden traducir en fallas intermitentes, hasta la incapacidad total del equipo para seguir operando. Si bien algunas de éstas fallas, sobre todo las intermitentes, no pueden ser catalogadas explícitamente como corrosión, si son precursores de ésta, como es el caso de la generación de cortocircuitos entre pistas por efecto de la presencia de humedad.

La corrosión de los componentes o partes de equipo electrónico es con frecuencia más crítica que la de otros objetos, ya que no se demanda una sensible pérdida de masa [3], como en los materiales estructurales, para que se presenten inconvenientes en la operación del sistema, además de que por corrosión se puede producir la falla de éstos. Esto se debe a que la degradación o deterioro afecta las propiedades eléctricas del dispositivo (conductividad, resistencia, etc.), y por consecuencia su desempeño. Por ejemplo la degradación de unas fracciones de miligramo en una pista de un circuito es razón más que suficiente para la pérdida de continuidad de éste. El funcionamiento de los dispositivos depende en gran manera de los requerimientos de los circuitos donde se encuentra el componente, y en general, las fallas inducidas por corrosión no se pueden definir de una manera confiable.

En contactos o conectores, pueden provocarse fallas (figuras 2.1 y 2.2) por mínimas cantidades de productos de corrosión, difícilmente apreciables a simple vista o incluso con un microscopio óptico de bajos aumentos, las cuales alteran la resistencia del material.

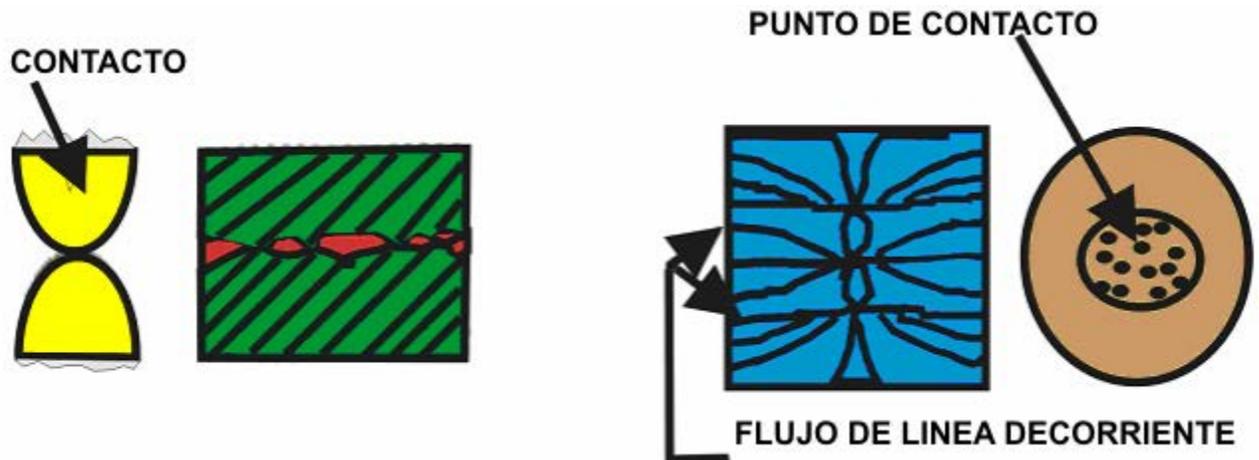


Figura 2.1. El flujo de corriente entre dos elementos de contacto (conectores) se produce a través de regiones discretas dado el grado de rugosidad que presentan las superficies, por lo que cualquier depósito de productos de corrosión en estas zonas dará como resultado un sensible incremento en la resistencia del circuito, influyendo por lo tanto en la señal transmitida[9].

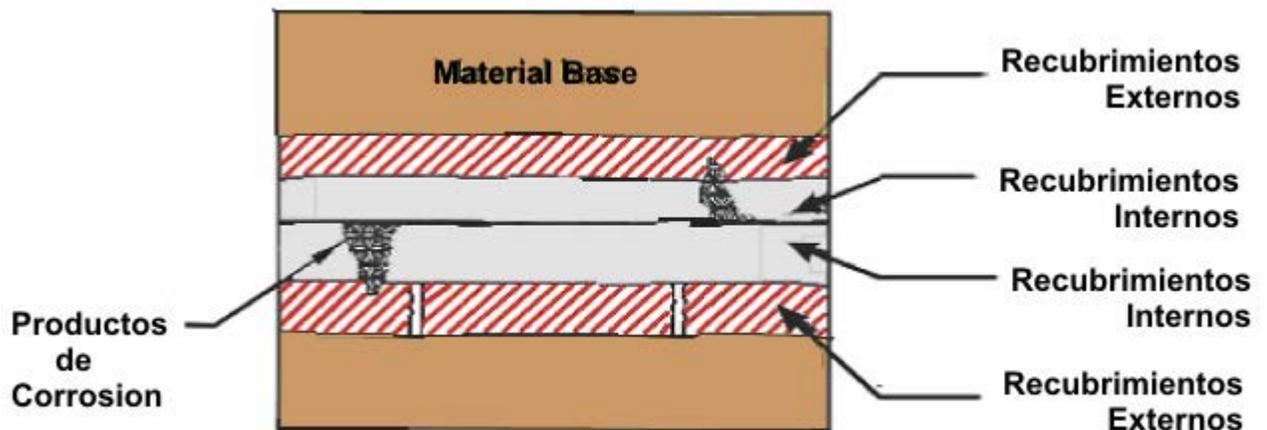


Figura 2.2. Depósito de productos de corrosión en las superficies de contacto, El efecto de esto es una disminución del área real de contacto [9].

La falta de conocimientos, por una apreciable cantidad de ingenieros electrónicos, con relación a la importancia que el deterioro por corrosión atmosférica tiene en las fallas del equipo, así como también por el tiempo necesario para que éstas se manifiesten, ha dado lugar a que estos fenómenos sean subestimados. Sin embargo, un estudio realizado por *The Electronic Analysis Group, Air Force Wright Aeronautical Laboratories* [10] dio como resultado que de los casos analizados se dictaminara que alrededor de un 20% de las fallas eran causadas explícitamente por corrosión, estimándose que un 83% de los problemas tenían su origen en materiales y manufactura.

Si bien el estudio de los efectos de la corrosión en equipo eléctrico data de los 1930's [23], esto debido a los problemas que se presentaron en centrales telefónicas. Sin

embargo, el énfasis en el análisis del efecto que la corrosión atmosférica tiene en el funcionamiento del equipo electrónico se remonta a mediados de los años 1960's, producto de los inconvenientes que los dispositivos electrónicos del equipo militar norteamericano presentaron durante la guerra de Vietnam [11]. A raíz de estos problemas se desarrollaron estudios [12, 13] de los cuales se concluyó que una cantidad apreciable de las fallas presentadas habían tenido su origen en fenómenos corrosivos, producidos por las condiciones ambientales extremas características de dicha región del planeta. Estas fallas se suscitaron debido a que durante el diseño no fue considerada la posibilidad de deterioro por medio ambiente. Dicha situación prevalece hasta hoy en día, a pesar de que durante las labores de mantenimiento se ha comprobado la presencia de estos fenómenos. Lo anterior sobre todo en condiciones que se caracterizan por una elevada humedad relativa típica de regiones tropicales o costeras, sino aun en sitios como la ciudad de México se llega fallas producto de las condiciones ambientales.

El desprecio o la subestimación del efecto que los fenómenos corrosivos pueden tener en las fallas del equipo electrónico se debe a diversas causas como la falta de información, la suposición de que las condiciones de servicio son favorables (aire acondicionado, reducida concentración de contaminantes, etc.) y por último basados en la limitada vida útil de una buena parte del equipo electrónico, el cual se vuelve obsoleto antes de que el deterioro por corrosión se manifieste.

Del estudio de Guttenplan [14, 15] se define la problemática de la corrosión en la industria electrónica, de acuerdo a las siguientes tendencias:

- Mayor densidad de componentes con menor tamaño y espaciamiento, y menores secciones metálicas. (figura 3.4)
- Requerimientos de pistas con baja resistencia.
- Exposición de equipo electrónico a condiciones más severas.

De los resultados de los estudios publicados se concluye que reducidas concentraciones de contaminantes [14, 16, 17] (características del medio ambiente de casi cualquier lugar del planeta) muy por debajo –ppb- de los umbrales de aceptación para seguridad y confort del ser humano, pueden causar daños por corrosión que conllevan a la falla del equipo electrónico.

Niveles bajos de humedad y contaminantes corrosivos pueden causar problemas en circuitos impresos (pistas), circuitos integrados, conectores eléctricos, potenciómetros, pilas y otros componentes.

Adicional a lo anterior se tiene la tendencia al uso generalizado de equipo de alta tecnología, en el que la calidad de salida de las señales producidas los vuelve más sensibles a pequeños daños generados por el medio ambiente

La corrosión en equipo electrónico puede ocurrir durante la manufactura, almacenaje, transporte o desde luego, durante el servicio [1, 4, 6]. Los principales agentes que

provocan el deterioro de componentes, conectores y pistas son [14,15,17,18,19] la humedad, los cloruros, H_2S , dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco y las partículas suspendidas; las cuales favorecen la precipitación de humedad y el inicio del fenómeno.

El ambiente al que están expuestos los circuitos electrónicos proviene de dos fuentes:

1. Materiales de los que está construido el equipo (degradación del polímero empleado en el encapsulado de microcircuitos), y los residuos de su propia manufactura (por ejemplo de los fundentes empleados en los procesos de soldadura).
2. Contaminantes presentes en la atmósfera.

Gouda [17] estudió en 1989 casos de corrosión en componentes de hardware mediante análisis microscópico y EDS (energy dispersive spectroscopy), determinando que, concentraciones de gases contaminantes 10 veces menores al límite permitido para el hombre, pueden dañar el equipo electrónico.

Por otra parte, se ha comprobado que pequeñas cantidades de residuos de cloro en circuitos encapsulados pueden originar corrosión severa del patrón conductor y migración iónica entre los caminos conductores. El problema se agrava con pares de metales no similares, que crean condiciones para corrosión galvánica. Esta situación es favorecida a través de la aplicación de recubrimientos con espesores inferiores a una micra y la presencia de diferencias de potencial eléctrico entre los elementos, así como el empleo de materiales que han sido seleccionados sin tomar en cuenta la resistencia a la corrosión como parámetro de elección.

Así, las concentraciones de dióxido de azufre, que se ha demostrado generan inconvenientes en equipo electrónico son del orden de 30ppbv (partes por billón volumen), mientras que el límite aceptable para exposiciones prolongadas del ser humano a este contaminante es del orden de 1000 ppbv; en el caso de ácido sulfhídrico (H_2S) las concentraciones correspondientes son 10 y 10000ppbv respectivamente. Un año de exposición en ambientes con tal agresividad puede resultar en un deterioro significativo del equipo o componentes electrónicos. Lo anterior se traduce que aún en ambientes catalogados normalmente como benignos, se ha encontrado daño.

De lo expuesto se concluye que en general cualquier dispositivo electrónico está expuesto a deterioro por corrosión ambiental. Sin embargo, algunas industrias y ambientes favorecen a ésta, en particular se puede hacer referencia al equipo instalado en climas semitropicales o tropicales, en ciudades con un alto grado de industrialización y como consecuencia de contaminación; tal como es el caso de Coatzacoalcos, Veracruz, y Tampico, Tamaulipas en México. Como ejemplo de esto en la figura 2.3, se observa (a diferentes grados de detalle) el estado de las tarjetas electrónicas de equipo telefónico de uso residencial retiradas de servicio después de tres años.

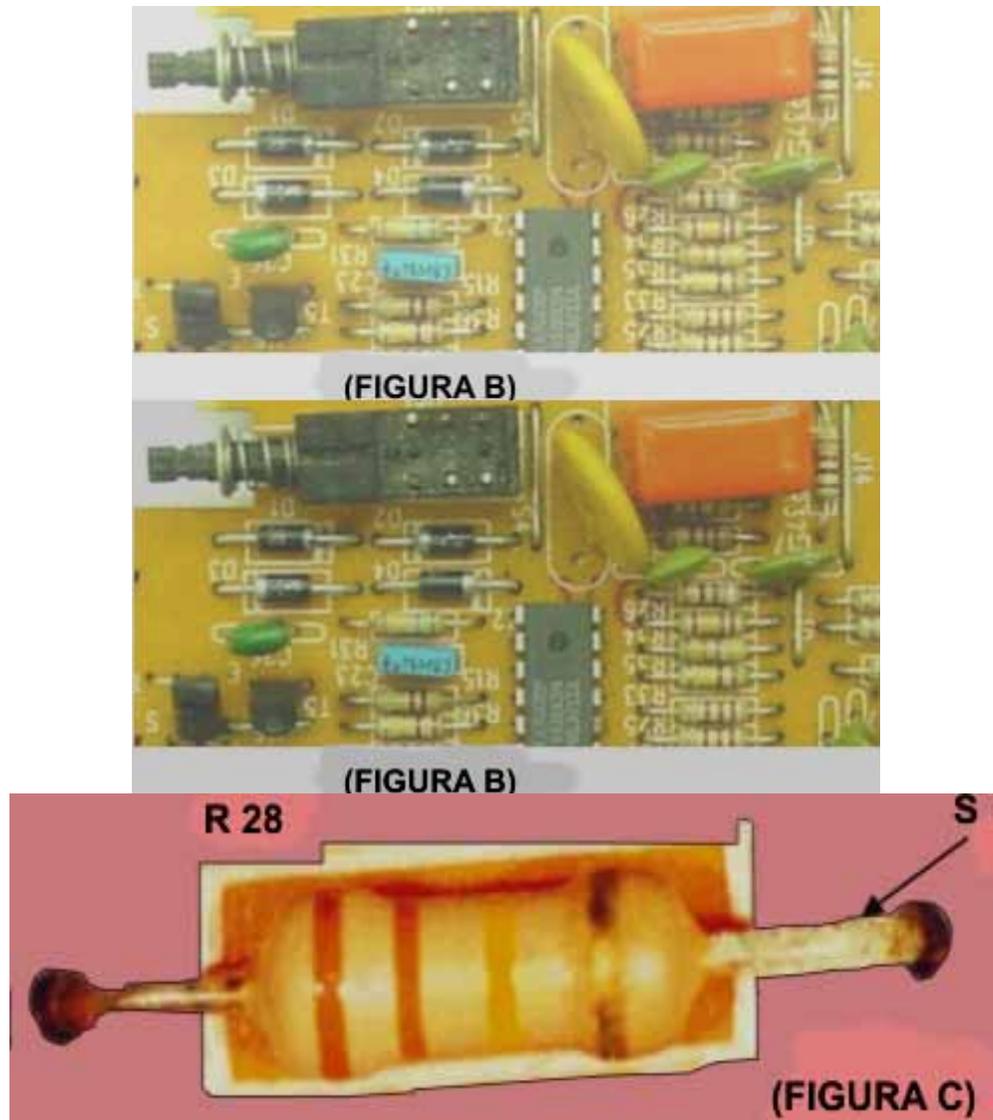


Figura 2.3. Circuito impreso correspondiente a un teléfono de tipo residencial instalado durante tres años en Coatzacoalcos, Veracruz (A). En (B) se observa la presencia de depósitos en algunos de los elementos metálicos de la tarjeta, a mayor detalle (C) es posible ver el depósito de sulfato(s) [9].

2.2 VARIABLES PRINCIPALES DEL DAÑO POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA, SU EFECTO Y PROCEDENCIA

Como fue ya mencionado en el capítulo 1 la corrosión atmosférica depende de la humedad del ambiente, la temperatura y los contaminantes que se encuentran dispersos en el aire. Dada la variabilidad que estos factores tienen, es prácticamente imposible desarrollar modelos matemáticos que permitan determinar con precisión el comportamiento del material para unas determinadas condiciones de exposición. Debido a las mismas situaciones es imposible realizar ensayos de laboratorio que permitan correlacionar el tiempo de ensayo con el de exposición real.

Por lo que respecta a las condiciones características de la exposición en interiores (en general típicas para el equipo y dispositivos electrónicos) estas son menos agresivas que las establecidas para exteriores [6, 7, 8, 20], esto considerando la misma situación geográfica. La agresividad de las atmósferas típicas en interiores es, en general, muy diferente para los países desarrollados que para las economías emergentes, esto se debe no solo a las diferencias climáticas sino más bien a la presencia de equipos de acondicionamiento de aire, situación que reduce sensiblemente los tiempos de humectación, a la vez de disminuir la concentración de contaminantes. En países como México el empleo de sistemas de aire acondicionado está muy limitado, lo que se traduce a que una gran parte del equipo electrónico esté sometido a condiciones mucho más críticas y agresivas que las encontradas en los países como EUA, Canadá y la Unión Europea. Por tal razón los resultados reportados en la literatura, con relación al deterioro del equipo electrónico, no pueden ser considerados de aplicación universal. Por consecuencia en países como México deberán tenerse mayores cuidados en cuanto al deterioro ambiental en los dispositivos electrónicos.

Para determinar la corrosividad de una atmósfera es necesario relacionar entre sí el efecto de todos los factores que influyen en los mecanismos de deterioro, como:

- a) Tiempo de humectación de la superficie metálica (habrá que tomar en consideración que no se requiere de una humedad relativa superior al 80 % para que se pueda presentar daño por corrosión). Para la corrosión de equipo electrónico el tiempo de humectación, que es una variable fundamental propuesta para el sistema ISO, no tiene la misma significación, ya que el concepto de humedad crítica no existe [6] y una elevada humedad no representa necesariamente elevadas velocidades de corrosión, aunque si es un factor de primordial importancia
- b) Cantidad de contaminantes que pueden depositarse en la superficie metálica, en particular sulfuros reactivos y cloruros reactivos.

De acuerdo a la norma ISO 9223:1992a [21], se consideran como elementos clave de la corrosión:

- Tiempo de humectación
- Los niveles de SO_2 y NaCl .

Como ya ha sido mencionado existen otros tipos de contaminantes que pueden ejercer un efecto agresivo: NO_x , H_2S , humos en zonas industriales, CaCl_2 y MgCl_2 , en las regiones costeras y otros específicos de un determinado microclima como el cloro, compuestos orgánicos, PH_3 [22], HF [23], partículas, etcétera. En la tabla 2.1 se presentan las fuentes más comunes de contaminantes de interés en la corrosión atmosférica.

Tabla 2.1. Algunas fuentes comunes de constituyentes reactivos del medio ambiente de acuerdo con la norma ANSI/ISA-S71.04-1985 “Condiciones del Medio Ambiente para Medidas de Procesos y Sistemas de Control: Contaminantes Aerotransportados” [9].

Formula	Constituyente	Fuentes Comunes
H ₂ S	Ácido sulfhídrico	Emisiones geotérmicas, actividades microbiológicas, procesamiento de combustibles fósiles, pulpa de madera, tratamiento de aguas de desecho, combustión de combustibles fósiles, fusión de minerales, emisiones de autos, manufactura de ácido sulfúrico.
SO _x	Óxidos de azufre	Combustión de combustibles fósiles, emisiones de autos, fusión de minerales, manufactura de ácido sulfúrico, humo de tabaco
HF	Acido Fluorhídrico	Manufactura de: fertilizantes, aluminio, cerámicos, aceros, dispositivos electrónicos, combustibles fósiles.
NO _x	Óxidos de nitrógeno	Microbios, emisiones de automóviles, combustión de combustibles fósiles, industria química.
N ₂	Nitrógeno orgánico activado	Emisiones de automóviles, desperdicio de animales, combustión de vegetales, aguas negras, pulpa de madera.
NH ₃	Amoníaco	Microbios, aguas negras, manufactura de fertilizantes, vapor geotérmico, equipo de refrigeración, productos de limpieza, máquinas heliográficas.
CO	Partículas de carbón Monóxido de carbono	Combustión incompleta (constituyente de aerosoles), fundición. Combustión, emisiones de automóviles, microbios, árboles y pulpa de madera
Cl ₂ , ClO ₂	Cloro Dióxido de cloro	Manufactura de cloro, manufactura de aluminio, molinos de papel, descomposición de desechos, productos de limpieza
HCl	Ácido clorhídrico	Emisiones de automóviles, combustión, procesos oceánicos, combustión de polímeros
HBr, HI	Componentes Halogenados	Emisiones de automóviles
Cl ⁻	Iones cloro	Contenido de aerosoles, procesos oceánicos, procesamiento de minerales.
O ₃	Ozono	Procesos atmosféricos fotoquímicos que involucra óxidos de nitrógeno e hidrocarburos oxigenados, emisiones de automóviles, filtros electrostáticos, etc.
C _n H _n	Hidrocarburos	Emisiones de automóviles, procesamiento de combustibles fósiles, humo de tabaco, tratamiento de agua, microbios, fuentes naturales, molinos de papel.
HCHO	Polvo Formaldehído	Cristal de roca, combustión, fuentes industriales diversas.
HCOO		Adhesivos, humo de tabaco, combustión de biomasa, plásticos.
H		

2.3 METALES Y ALEACIONES COMÚNMENTE UTILIZADAS EN DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS Y SU SENSIBILIDAD A LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES

De los metales más utilizados en la industria eléctrica y electrónica son aluminio (aleaciones de Al-Si, Al-Cu), cobre, aceros galvanizados e inoxidables, latón, soldaduras de plomo-estaño, y níquel, oro, plata y estaño como recubrimientos. Cada uno de éstos presenta una sensibilidad y comportamiento diferente ante los diversos contaminantes que se encuentran en la atmósfera, para este caso deberán tomarse paradigmas que consideren los espesores y condiciones en las cuales se encuentran cada uno de los metales bajo análisis, por consecuencia no deberán extrapolarse los resultados obtenidos

en elementos estructurales para el comportamiento a nivel de dispositivos eléctricos y electrónicos.

ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

Son sensibles a la exposición en atmósferas contaminadas con NO, NO₂, Cloruros y SO₂ [19, 20]. Así mismo se observa un efecto de aceleración de la corrosión provocada por el Cl₂, y HCl.

Los productos de corrosión encontrados después de la exposición a SO₂ son Al₃(SO₄)₂, (OH)₅, 9H₂O y sulfatos de aluminio hidratados, la exposición a este contaminante conduce a un ataque localizado, en la capa superficial.

Por la exposición de componentes de aluminio a óxidos de nitrógeno se produce alumina (Al₂O₃) y/o hidróxidos de aluminio (Al(OH)₃).

Ante la presencia de ozono (O₃) se presenta corrosión uniforme, dando lugar a los mismos productos que cuando el aluminio es expuesto a NO₂.

Con gases tales como H₂S y CO₂, o hay incremento en la velocidad de corrosión.

No es susceptible a crecimiento dendrítico por migración electrolítica.

NÍQUEL

Es susceptible a contaminantes tales como el SO₂, Cl₂, NO y NO₂ [7, 24]. La mayoría de los productos se presentan en forma de óxidos o hidróxidos, nitratos o amidas. En la exposición a SO₂ se forman sulfatos hidratados (NiSO₄ nH₂O). Con el NO₂ se generan óxidos e hidróxidos (Ni(OH)₂). De acuerdo a lo reportado en la literatura el níquel parece no ser afectado por el H₂S, y el NH₃ presentes en la atmósfera, los cuales llevan a un estado de pasivación al material.

ORO

Normalmente se utiliza como recubrimiento. Por ser un metal noble no es susceptible a la oxidación en condiciones atmosféricas y por ende a una gran variedad de contaminantes. Presenta aceleración de la corrosión al ser expuesto a NO_x (NO+NO₂), así como para una mezcla de NO₂ y SO₂, [25]. Sus principales inconvenientes se generan cuando al ser aplicado como recubrimiento, éste resulta poroso [16,26] dando lugar a un fuerte efecto galvánico. Se ha comprobado que en muchas ocasiones su empleo, más que benéfico para el sistema, resulta perjudicial por su elevado potencial catódico.

PLATA

Es sensible a H_2S , Cl_2 y HCl [7, 8]. Los gases como el Cl_2 y el HCl aceleran su deterioro; entre sus productos de corrosión están los cloruros, sulfatos y nitratos.

2.4 INCONVENIENTES GENERADOS POR EFECTO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN DIVERSOS ELEMENTOS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

El equipo electrónico típico (figura 2.4) consiste de una variedad de componentes tales como tarjetas de circuitos impresos, circuitos integrados, dispositivos discretos (interruptores, resistencias, diodos, juntas de soldadura), conectores y gabinetes. Los componentes al interior están expuestos usualmente a los mismos corrosivos del exterior, aunque las concentraciones pueden variar.

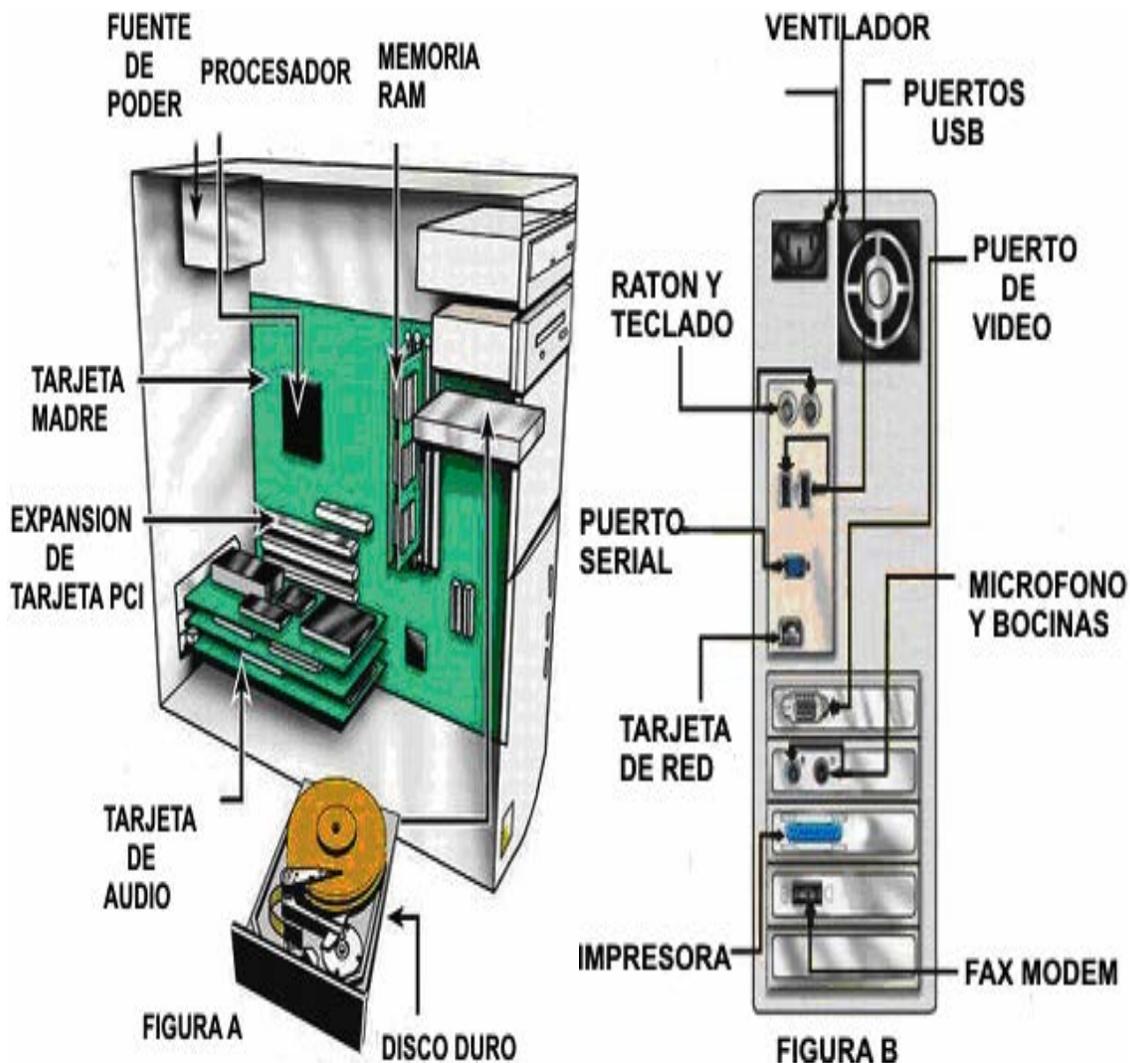


Figura 2.4. Interior de una computadora (PC) y las partes que la componen. (A) Vista lateral izquierda de la PC. (B) Vista de la parte de atrás de una PC [27].

Como ha sido mencionado los mecanismos de corrosión atmosférica en los componentes electrónicos semejantes a aquellos que se presentan en otras situaciones, con la diferencia de que efectos que en otras condiciones sería despreciables en el equipo electrónico pueden ser hasta catastróficos. Considerando que puede ocurrir una gran variedad de fallas inducidas por corrosión, es conveniente orientar el análisis de acuerdo a las diferentes partes que se pueden encontrar en cualquier dispositivo electrónico.

LA TARJETA DE CIRCUITO IMPRESO

Las partes metálicas de éstas, tales como el patrón conductor, están protegidas habitualmente contra los efectos ambientales con un recubrimiento orgánico (cuyo espesor es variable en función de las condiciones de servicio esperadas) [16,17] o mediante tratamientos de pasivación, asimismo es usual el empleo de recubrimientos adicionales luego de que los componentes han sido montados. Otras partes metálicas de un circuito impreso, tales como contactos, conectores e interruptores; están expuestas al medio sin protección alguna, y por tanto son altamente propensas a los efectos de la corrosión atmosférica.

LOS CONECTORES

Consisten comúnmente de una base de cobre, latón, cobre-berilio u otras aleaciones de cobre recubiertas con una capa delgada de oro, estaño o níquel, empleándose comúnmente recubrimientos intermedios con respecto a la capa superficial.

LOS CONTACTOS

Durante el contacto entre dos superficies, el verdadero contacto eléctrico se da solamente en pequeños puntos (figura 2.1) donde se juntan las irregularidades de ambas superficies. El área de contacto mecánico está determinada principalmente por la fuerza de contacto y la dureza de los materiales. Cuando la corriente circula a través de los limitados puntos de contacto físico entre las superficies se da lugar a la denominada "resistencia de contacto". Durante la corrosión de la superficie de contacto, resulta con frecuencia una capa uniforme de productos de corrosión (figura 2.2), la cual provoca una caída de voltaje adicional. Más común es que el ataque de corrosión origine productos de corrosión distintos que reduzcan el área o el número de los puntos de contacto. Una disminución del área de contacto eleva el riesgo de fallas de contacto intermitentes. Si existen películas superficiales de productos de corrosión o contaminantes orgánicos, entonces la corriente que fluye a través del contacto se encuentra con una resistencia adicional en las películas, por lo que el área por donde circula la corriente puede ser aún menor que el área de contacto mecánico.

En contactos eléctricos recubiertos con finas películas de oro, las cuales es común que sean porosas (el recubrimiento de oro presenta poros y otros defectos que alcanzan el recubrimiento inferior o al metal base), estas condiciones pueden crear una celda galvánica donde el sus trato se corroe y los productos de corrosión llenan los poros,

migran a lo largo de las paredes del poro y finalmente llegan a la superficie de contacto, provocando (figura 2.5) un incremento en la resistencia del contacto y pérdidas de la señal. Debido a la porosidad inherente a los espesores característicos de depósito los contactos recubiertos con oro tienen una vida de servicio muy limitada en ambientes agresivos.

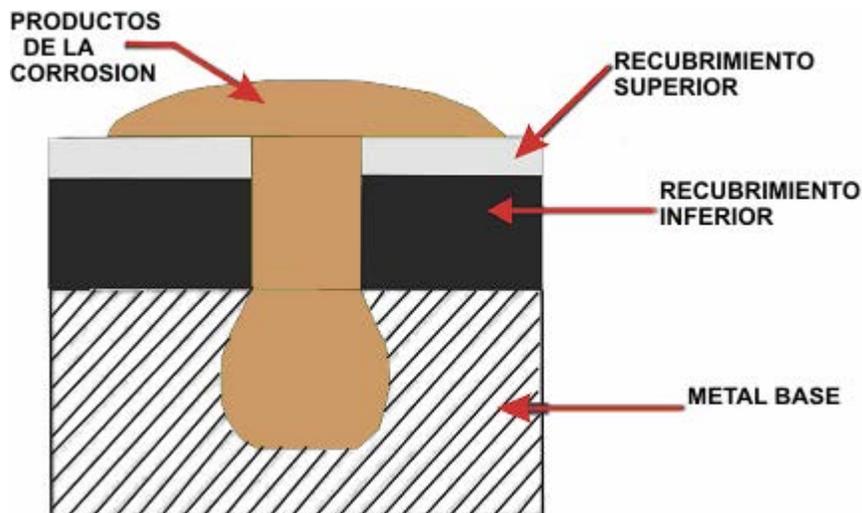


Figura 2.5. Descripción esquemática de la corrosión a través de los poros presentes en recubrimientos de muy limitado espesor [9].

No solo en los depósitos de oro se puede presentar un ataque a través de las propiedades del recubrimiento, en la figura 2.6 se muestra una superficie recubierta con níquel (figura 2.7) el cual presenta un depósito apreciable a simple vista así como un ataque muy localizado a través de las discontinuidades del recubrimiento.

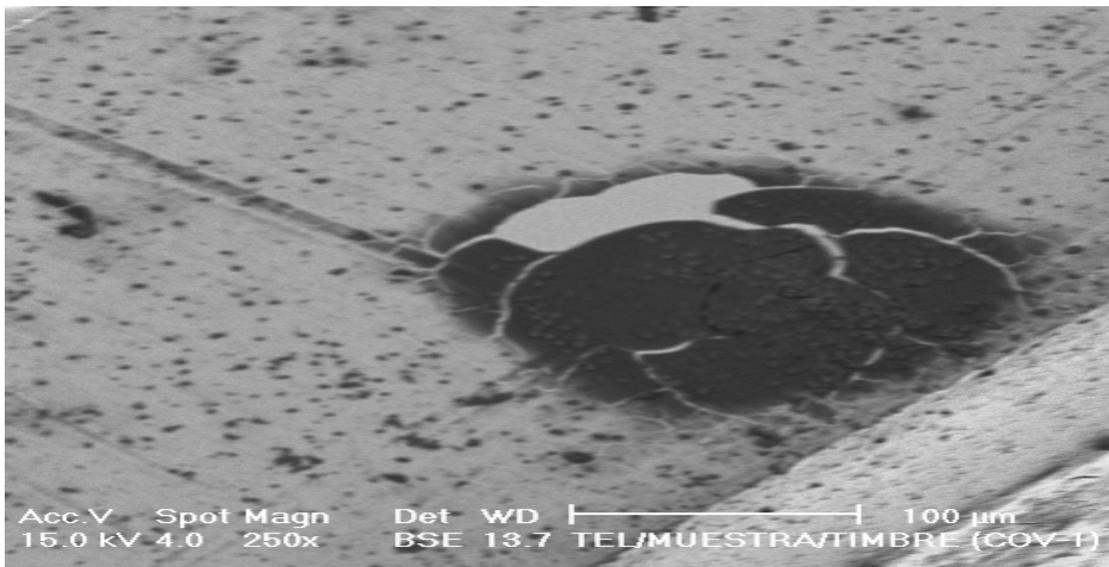


Figura 2.6. Timbre de aparato telefónico. Se trata de una pieza de latón recubierta con níquel [9].

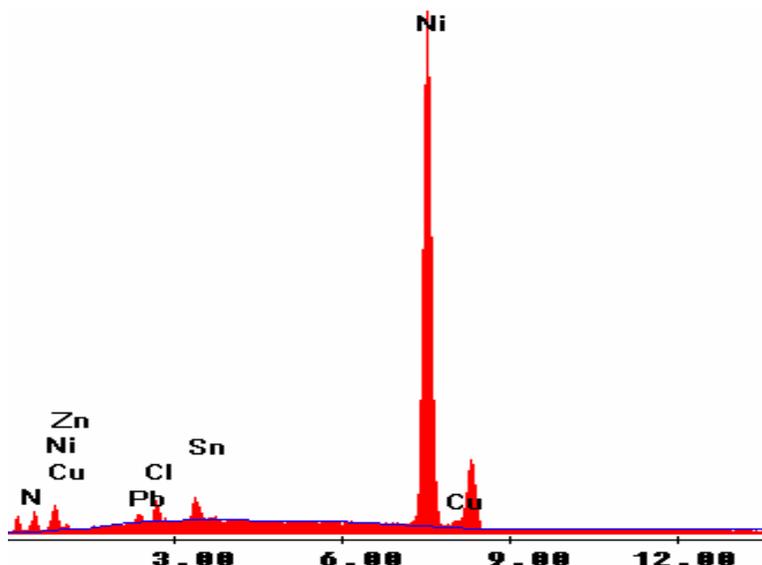


Figura2.7. Análisis mediante EDS del recubrimiento. Se presentan picos de Cu y Zn como consecuencia de un recubrimiento muy delgado y dado que el material base es latón [9].

Los productos de corrosión que se forman en los bordes de las superficies de contacto, se depositan sobre la capa superior de oro, forman una película aislante en su superficie. Es evidente que la presencia de depósitos de metales muy nobles como el oro y en menor medida la plata o el cobre da lugar a la formación de micro pilas galvánicas con un potencial muy elevado, situación que favorece el ataque y que acelera el deterioro de la parte y la inhabilitación del recubrimiento. Todo lo anterior se traduce en que la práctica de aplicar delgados depósitos de oro para mejorar el contacto entre elementos eléctricos da como resultado en ambientes agresivos notorias desventajas, todo lo contrario de la intención inicial que orienta el empleo del depósito. El níquel, que se usa como recubrimiento base en algunas ocasiones, reduce la formación de productos de corrosión del cobre. Sin embargo, en algunos ambientes, la corrosión y la formación de los productos de corrosión puede ser mayor en el níquel que en el cobre. Esto es característico para el caso de atmósferas que presentan SO_2 y cloro como principales contaminantes.

El deterioro de superficies recubiertas con oro tiende a ser acelerado por la presencia de diversos contaminantes, en el caso de que se tenga un revestimiento base níquel o que el material sobre el cual se realiza el depósito sea cobre el deterioro será fomentado por altos niveles de humedad relativa, SO_2 , Cl_2 y sulfuro de hidrógeno (H_2S). La formación de depósitos es favorecida por la presencia de H_2S . Atmósferas agrícolas o industriales tienen un efecto dañino en las superficies recubiertas con oro. Las industrias donde se manejan el Cl_2 y el H_2S , son uno de los ambientes más agresivos para las superficies recubiertas con oro.

En las superficies recubiertas con paladio o platino, los contaminantes orgánicos pueden resultar en la formación de capas aislantes. En este caso, la película superficial es un

polímero orgánico en vez de una capa de óxido u otro producto de corrosión. Para aminorar este efecto, el paladio se recubre algunas veces con una delgada capa de oro. En ocasiones en algunos contactos se puede presentar reducidos movimientos relativos entre las superficies, situación que se traduce en un efecto combinado de corrosión-desgaste. Este movimiento relativo se puede causar por variaciones eléctricas o magnéticas repetitivas o por movimientos mecánicos o térmicos. Los efectos de corrosión-desgaste dan lugar a una aceleración del deterioro al presentarse una remoción de las capas de pasivación. Los metales empleados en contactos que como el estaño, forman rápidamente óxidos, son más propensos a este tipo de deterioro.

De lo mencionado se concluye que el tipo de falla que se presenta usualmente en contactos o conectores eléctricos dependerá del recubrimiento, si éste es de oro se generaran depósitos y corrosión en las discontinuidades del recubrimiento, mientras que si se trata de estaño el dominante será la corrosión desgaste.

LOS CIRCUITOS INTEGRADOS

Se utiliza una gran variedad de materiales metálicos. La estructura que forma el patrón conductor conecta chips, resistencias y otros componentes. Éstos presentan pistas, con separaciones mínimas, de aluminio o aleaciones de éste, así como de cobre. Los conductores pueden ser revestidos con oro, estaño, paladio o plata.

LOS CONDUCTORES

Tienen dimensiones extremadamente pequeñas (hasta del orden de una micra) y forman un complejo patrón geométrico que es muy sensible a la presencia de humedad y contaminantes. Para brindar protección química y mecánica, muchas secciones de los conductores están cubiertas con una capa aislante de nitruro de silicio y/o una película de polímero orgánico.

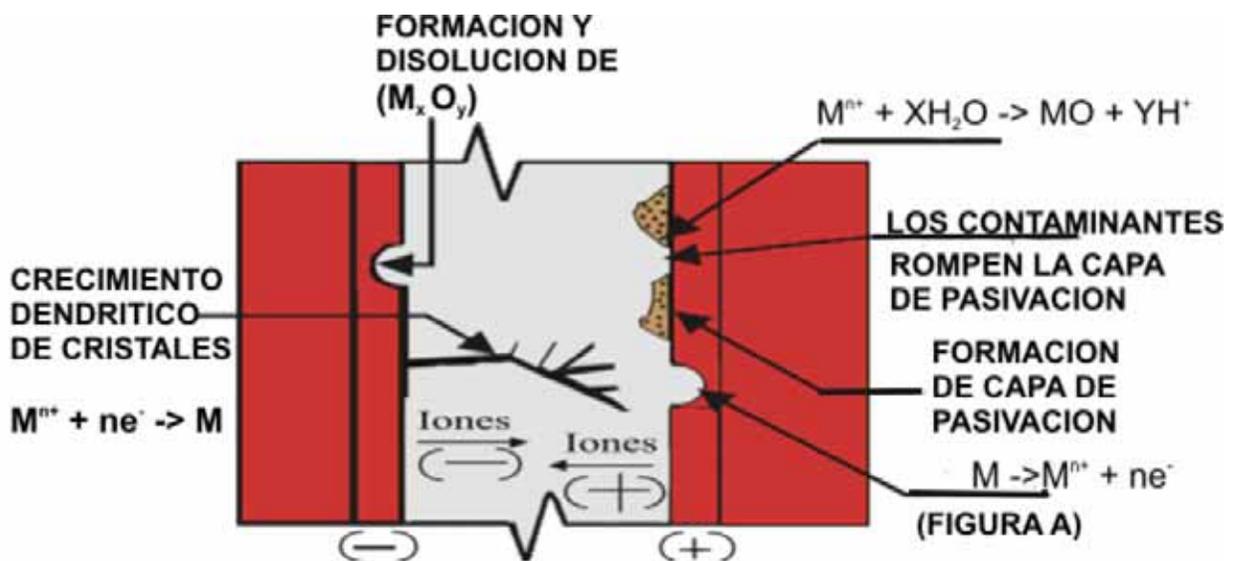
LOS MICROCIRCUITOS (CHIPS)

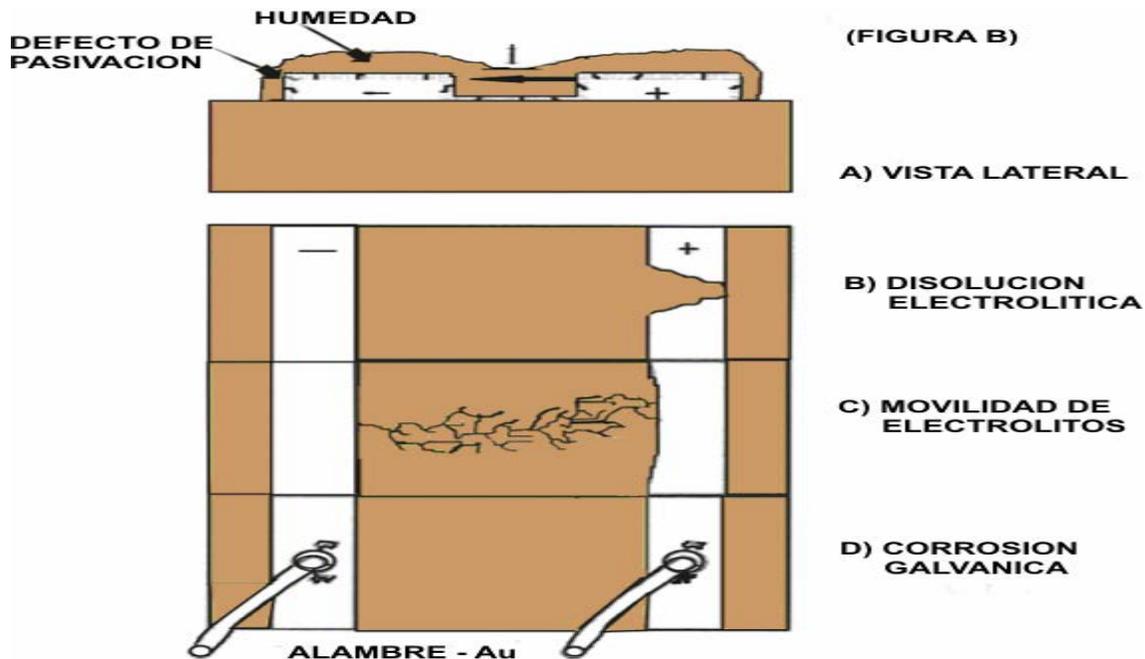
Se encapsulan en plástico rígido e impermeable al agua o se coloca en un paquete hermético para que tenga mejor protección. No obstante, el desempeño del chip puede ser influenciado por defectos en la capa aislante tales como micra grietas y porosidades, a través de los cuales puede penetrar la humedad y los contaminantes. Los contaminantes también pueden originarse del material del encapsulado o de residuos de químicos empleados en el proceso, lo cuales quedan atrapados en el mismo empaque del chip. Los microcircuitos que operan en altos niveles de potencia se corroen con menor frecuencia que los que trabajan a bajos niveles. La razón es que la temperatura en la superficie del chip es más alta, y por lo tanto la humedad relativa a alta potencia es menor que la del medio ambiente.

LAS PISTAS DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS

Pueden sufrir diversos inconvenientes (figura 2.8) tales como disolución electrolítica, picaduras, migración iónica y corrosión galvánica. Asimismo se pueden presentar problemas intermitentes bajo condiciones de humedades relativas muy elevadas, situación que se traduce en la presencia de condensado sobre éstas, condición que a su vez da lugar a corto circuitos y fallas del sistemas. Por ejemplo en equipo telefónico instalado en zonas costeras y donde las condiciones en el interior son prácticamente las mismas que en exteriores. En el caso de la disolución electrolítica ésta se presenta en conductores de aluminio en presencia de diferencia de potencial eléctrico entre las pistas conductoras. Cuando existe la presencia de condensados sobre las pistas el conductor que posee el potencial eléctrico más alto actúa como el ánodo y el conductor se disuelve. Cuando los contaminantes contienen cloruros, la disolución del aluminio ocurre en forma semejante a las picaduras, y el dispositivo puede fallar por una discontinuidad en el conductor. Las pistas de otros metales, tales como el cobre, también se pueden disolver de manera anódica, aun si la diferencia de voltajes entre los conductores es bastante pequeña, la migración iónica puede ocurrir debido a que las pequeñas distancia entre conductores crean elevadas fuerzas de campo eléctrico. Cuando los iones metálicos llegan al conductor opuesto, polarizado catódicamente, los iones se pueden depositar siguiendo un patrón dendrítico. Este patrón es mucho más voluminoso que el volumen correspondiente de metal disuelto y puede resultar en un corto circuito entre los conductores adyacentes. Mientras más se reduzcan las dimensiones de los circuitos integrados, la disolución electrolítica y la migración iónica tienen el potencial para convertirse en mecanismo de falla aun más importantes en el futuro.

En partes de circuitos integrados con deficiente protección superficial se pueden presentar fenómenos de circulación de corriente a través de las superficies, esto a través de iones metálicos, humedad en combinación con polvo y contaminantes que incrementan su conductividad, situaciones todas que favorecen los procesos corrosivos.





Figuras 2.8(A) y 2.8(B). Mecanismos de falla que se pueden presentar entre dos caminos conductores en un dispositivo electrónico [9].

OTROS ELEMENTOS DE INTERCONEXIÓN

En los circuitos y dispositivos empleados en la electrónica también es común que se presenten fenómenos de corrosión galvánica, ya que además de que las partes se encuentran a distancias muy reducidas, en muchas ocasiones éstas son producidas de materiales muy disímolos, situación que se traduce en la formación de celdas galvánicas. La corrosión galvánica también se presenta cuando piezas (por ejemplo conectores) fabricados de latón son recubiertos por estaño para favorecer operaciones de soldadura posteriores. En este caso se parte de láminas de latón las cuales son recubiertas por inmersión o electrolíticamente con estaño, para posteriormente proceder al troquelado y formado de la parte. Resulta evidente que se forma una celda galvánica entre la superficie estañada y los bordes de latón de la pieza, los cuales se ponen al descubierto durante el troquelado.

En las uniones soldadas también es usual que se presenten problemas por corrosión esto se debe principalmente a la presencia de los fundentes utilizados en el proceso de soldadura los cuales no son eliminados después de la operación, además de contaminar favorecen la condensación de humedad por sus propiedades higroscópicas.

2.5 TIPOS DE CORROSION EN DISPOSITIVOS ELECTRONICOS

Los metales y aleaciones que están comúnmente presentes en componentes y dispositivos electrónicos abarcan [16, 28]:

- a. Aluminio y cobre empleados en pistas.
- b. Latón en terminales y conectores.
- c. Aceros inoxidable y galvanizados utilizados para jaulas de Faraday y como elementos de soporte o estructurales
- d. Estaño, oro, plata y níquel utilizados comúnmente como recubrimientos
- e. Aleaciones plomo-estaño las cuales se aplican en procesos de soldadura.

Con base en esto y a partir de la diversidad de ambientes en los que éstos se encontrarán presentes es factible visualizar el grado de complejidad bajo el cual se produce el deterioro por corrosión en equipo electrónico.

Algunos autores [16, 29, 30] se refieren a los siguientes tipos de corrosión en componentes electrónicos (figuras 2.1 a 2.2):

- a. Corrosión anódica. Dado el espaciamiento existente en circuitos integrados, cuando un potencial es aplicado se producen gradientes del orden de 10^5 , 10^6 V/cm, los cuales aceleran las reacciones electroquímicas y la migración iónica. En circuitos integrados que trabajan en potenciales positivos es posible la corrosión de elementos con aluminio o recubiertos con éste, esto se produce cuando la combinación del campo eléctrico, la humedad atmosférica y la contaminación con haluros alcanza valores críticos para los cuales se presenta el deterioro de los recubrimientos con aluminio. Metalizados de oro y cobre son susceptibles de corrosión en esas condiciones.
- b. Corrosión catódica. Metalizados de aluminio trabajando en polaridad negativa se pueden corroer en presencia de humedad en condiciones alcalinas.
- c. Migración metálica electrolítica. Detectada originalmente en los conectores mecánicos, este inconveniente se presenta en aleaciones de plata bajo condiciones de humedad y campo eléctrico. Bajo estas condiciones los iones de plata migran a las superficies catódicas formando dendritas, las cuales crecen y eventualmente provocan cortocircuitos y arcos. Se ha demostrado que bajo condiciones particulares de humedad y gradientes de voltaje se presentan daños severos de tal forma que una exposición de 30 días equivalga a 4 años de servicios. Otros metales susceptibles de migración electrolítica son el oro, estaño, plomo, paladio y cobre.
- d. Deterioro a través de discontinuidades en el recubrimiento. Para prevenir que se peguen los conectores y contactos eléctricos es usual que éstos se recubran con un metal noble como por ejemplo el oro. Como este recubrimiento no es uniforme entonces el sustrato puede presentar corrosión en las discontinuidades (figuras 2.1 y 2.8), acentuándose el problema por la celda galvánica a la que se da lugar. Si el sustrato es cobre o plata y es expuesto a un ambiente rico en sulfuros o cloruros los productos de corrosión pueden emerger (fluir) de las discontinuidades formando una capa de alta resistencia eléctrica.

- e. Corrosión-desgaste de conectores con recubrimiento de estaño. En contactos recubiertos con estaño se presenta la formación de depósitos de óxido de estaño.
- f. Corrosión galvánica. Este fenómeno se presenta cuando dos materiales diferentes como el aluminio y el oro están presentes en el dispositivo, tal como sucede en circuitos integrados donde los polímeros empleados para el empaque del dispositivo son porosos o los elementos de sellos se fracturan, situación que en combinación con la humedad del ambiente da lugar a un efecto galvánico entre los diferentes componentes metálicos del circuito.
- g. Corrosión acelerada por la presencia de fundentes. El empleo de fundentes es necesario en los procesos de unión de elementos conductores, sin embargo éstos en ocasiones no son removidos después de la operación, lo cual aunado a su carácter higroscópico da lugar a la aceleración del deterioro por corrosión.
- h. Corrosión de aluminio por cloruros halogenados. Los solventes halogenados empleados en la producción de circuitos integrados e impresos producen deterioro en los componentes de aluminio, la contaminación de la humedad por los solventes incrementa la velocidad de corrosión.

2.6 CORROSION EN DIFERENTES TIPOS DE ATMOSFERAS

Para la mejor comprensión de como afecta el medio ambiente en la corrosión atmosférica, se han agrupado las condiciones climatológicas y los contaminantes, en diferentes tipos de ambiente. Los principales son:

- i) Industrial; se caracteriza por las emisiones de la industria pesada, en particular por presentar todo tipo de contaminación por azufre en forma de dióxido de azufre principalmente, el cual proviene en su mayoría de la combustión. Asimismo se presentan concentraciones importantes de cloruros, fosfatos y nitratos.
- ii) Urbano; este tipo de ambiente es similar al rural con bajo nivel de emisiones producto de la industria pesada, sus contaminantes provienen también de la combustión de materiales fósiles. Fundamentalmente son producidas por fuentes móviles, así como las antropogénicas características. Los contaminantes más usuales son NO_x (NO + NO₂) y SO_x, principalmente.
- iii) Marino; Se caracteriza por tener altas concentraciones de cloruros. La concentración de NaCl en este ambiente se mantiene superior a los 15 mg/m² -día, no importando el nivel de SO₂ que se presente. La corrosividad se puede ver incrementada por la existencia de industria en la zona, así como también por la temperatura y la dirección de los vientos dominantes.
- iv) Rural; Se caracteriza por la presencia de contaminantes provenientes del empleo de fertilizantes y la descomposición de materia orgánica lo cual da como resultado la activación de otros mecanismos de corrosión, debido a la presencia de iones amonio, nitratos, etc.

Se pueden plantear subgéneros a este tipo de ambientes o combinaciones, resultado de los contaminantes principales. Desde el punto de vista de los contaminantes se podría hacer referencia a atmósferas marino industrial, por ejemplo Tampico y Coatzacoalcos, o referir que zonas del sur de la ciudad de México (ciudad universitaria, por ejemplo) se pueden caracterizar por una atmósfera rural muy a pesar de estar en plena zona metropolitana.

La concentración de contaminantes en exteriores e interiores se ve influida por las características de las construcciones, donde resulta evidente que aquellas que cuentan con aire acondicionado presentan condiciones, para muchos de los contaminantes, muy por debajo de las exteriores. Por su parte en climas como el de México es muy usual que las concentraciones de los contaminantes sean muy similares en el interior y exterior, con el inconveniente adicional de la presencia, en interiores, de una alta concentración de contaminantes producto de las actividades del ser humano.

Si bien, la mayoría de los estudios se han desarrollado para corrosión en exteriores y se considera ésta como la más agresiva, es necesario considerar que el equipo electrónico va a estar expuesto a una condición típica de interiores, en donde la presencia de humedad sobre las superficies metálicas se debe a fenómenos de condensación.

Se ha considerado oportuno, asimismo, analizar por separado los efectos puramente meteorológicos y los producidos por la contaminación, y asociarlos después en la elaboración de las cifras finales de corrosión, para que el tratamiento dado al problema de corrosión atmosférica coincida con los diferentes tipos de atmósferas que se han explicado y esto sirva para la elaboración de lo que se presenta en la (tabla2.2).

Hasta agosto de 1990 se contaba con las siguientes estaciones distribuidas por todo el país:

Las estaciones señaladas iniciaron su periodo de exposición de metales en el mes de agosto de 1989, estando prevista la primera retirada de probetas para finales del mes de agosto de 1990. Se han expuesto probetas de acero, cobre, zinc y aluminio de 150 x 100 μm y de diferentes espesores, de acuerdo con la metodología propuesta por la Organización Internacional de Estandarización (ISO).

Tabla 2.2. Diferentes tipos de atmósfera que se presentan en la Republica Mexicana [31].

<i>Estación</i>	<i>Tipo de atmósfera</i>	<i>Institución responsable</i>
San Luis Potosí	Urbana	Instituto de metalurgia, UASLP
Acapulco	Marina-urbana	IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas)
Cuernavaca	Urbana	IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas)
Distrito Federal	Urbana	Facultad de Química de la UNAM
Irapuato	Rural	CFE (Comisión Federal de Electricidad)
Mérida	Urbana	CINVESTAV, IPN (Centro de Investigación y Estudios Avanzados)

Considerando los parámetros que mayor influencia tienen en la corrosión atmosférica [7,8,32] y en particular en el deterioro del equipo electrónico [6,10,14,16,17,33], de la definición de los diferentes tipos de atmósferas y tomando en cuenta los climas que principalmente se encuentran en México, se definieron las localidades de las que se capturarían los especímenes (tabla 2.2). Para esto también se consideró la factibilidad de contar con los datos climáticos (figura 2.9) y de los contaminantes de la región (datos de estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos).



Figura 2.9. Distribución Climática en la República Mexicana [34].

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL DETERIORO DEL EQUIPO ELECTRÓNICO, POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA, PARA LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS CARACTERÍSTICAS DE LA REPUBLICA MEXICANA.

3.1. CONCEPTOS GENERALES

Los problemas de corrosión en componentes y equipos electrónicos en México, son ocasionados por la interacción de los factores climáticos y ambientales con los componentes electrónicos, presentes en el interior de las plantas industriales.

El estudio de la corrosión en componentes electrónicos en interiores ha tomado gran importancia en varias ciudades de México, como es el caso de Mexicali; Baja California, debido a problemas en la manufactura ocasionados por corrosión en maquiladoras que se encuentran establecidas en dicha ciudad.

Extensas zonas en el interior de plantas industriales no disponen ni de equipos de remoción de contaminantes, tales como ácido sulfhídrico (H_2S), polvo, bióxido de azufre (SO_2), iones Cloro (Cl^-), óxidos de nitrógeno (NO_x), ni de equipos de aire acondicionado que controlen la humedad del ambiente.

Los contaminantes que ingresan a las plantas se depositan sobre los componentes electrónicos, su higroscopicidad permite la absorción de humedad del ambiente, formándose un electrolito que facilita el proceso de corrosión: Incluso a baja humedad, el H_2S y el SO_2 provocan la sulfatación de la Plata y del Cobre, originando problemas de soldabilidad.

En el equipo electrónico, la corrosión es definida como el deterioro de los componentes metálicos, resultado de una reacción con su ambiente. Gases corrosivos y vapor de agua, al tener contacto con los metales provocan el crecimiento de varios productos de la reacción química. A medida que la reacción química continua, estos productos de corrosión forman capas insolubles sobre los circuitos produciendo fallas como son:

- Cortos circuitos.
- Picaduras.
- Grietas.
- Perdida de la masa del metal.

Los contaminantes atmosféricos aceleran la corrosión a través de su acción sobre la conductividad eléctrica del proceso catódico y anódico.

Los diseños actuales en los equipos electrónicos requieren del uso de una gran cantidad de componentes y un rápido procesamiento de señales, resultando en componentes más pequeños y espaciamiento reducidos, así como de elementos metálicos muy delgados.

Niveles extremadamente pequeños de contaminantes presentes en el ambiente donde se manufacturan estos equipos provocan problemas por corrosión.

Los problemas por corrosión mas comunes que se presentan durante la manufactura de los equipos electrónicos son:

- La sulfuración de la Plata y el Cobre.
- El crecimiento de filamentos y cristales de sulfuro de Plata (Ag_2S).
- Corrosión en recubrimientos metálicos.

Cuando hay una capa Ag_2S suficientemente gruesa y una temperatura adecuada, comienza un proceso de crecimiento de pequeños filamentos de Ag_2S . Tal es el caso del filamento de Ag_2S que provocan un sobrecalentamiento de un conector de plata. Los filamentos crecen en áreas expuestas a H_2S generando un aumento en la resistencia eléctrica del elemento originando un sobrecalentamiento, interrupción en el flujo de la corriente y al final se produce una falla.

También el cobre es susceptible a este fenómeno originando sulfuro de cobre (Cu_2S). Algunos componentes electrónicos son recubiertos en sus terminales con un mejor conductor como la plata pero si el recubrimiento presenta defectos, el vapor de agua y compuestos corrosivos penetran hacia el metal base ocasionando corrosión y desprendimiento del material.

3.2. ACCIÓN DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES EN EL INTERIOR DE LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS

Los contaminantes y factores ambientales como la humedad, penetran a distintas zonas de las plantas industriales generando un ambiente corrosivo que afecta a los metales con los que se manufacturan los componentes y equipos electrónicos.

La presencia de humedad es crucial para inducir la corrosión. La naturaleza electroquímica del proceso de corrosión implica la presencia de un electrolito proveniente de la atmósfera. La difusión del oxígeno proveniente del aire disuelto y de contaminantes a través de la capa acuosa es el factor que controla la velocidad de corrosión. El electrolito formado por la humedad presente en el ambiente es un promotor de la reacción electroquímica; también proporciona una mayor velocidad de absorción de contaminantes y aumenta la corrosividad del electrolito.

La velocidad de corrosión aumenta con la temperatura, por el incremento de la energía de activación de las reacciones químicas y electroquímicas acrecentando la velocidad de difusión en el electrolito. Como resultado de los procesos de dilatación térmica que experimentan los metales ante los cambios cíclicos de temperatura, los óxidos que los recubren se rompen y se desprenden. Así, una nueva superficie desnuda y activa se pondrá en contacto con el ambiente provocando la pérdida de masa.

La sulfatación del cobre por acción del H_2S y de SO_2 ocurre incluso a baja humedad. El níquel en ambientes con ligera contaminación sufre poca corrosión visible; la intensidad de corrosión se determina por el contenido SO_2 y por la humedad.

En la superficie del acero, aparecen óxidos y otros productos de corrosión en forma espontánea. El acero tiene una capacidad de protección limitada y es muy sensible a la humedad y SO_2 .

La velocidad de corrosión de la plata en interiores y en exteriores es severamente afectada por la presencia de los iones de cloruro, H_2S y SO_2 . Los NO_x aceleran el proceso de corrosión de la plata. El estaño rápidamente se cubre con una capa de óxido con buenas propiedades de protección, pero el contenido de cloro y cloruros en la atmósfera, ataca la capa pasiva y se incrementa la velocidad de corrosión, especialmente en combinación con una alta humedad.

En presencia de humedad los iones de cloro reaccionan rápidamente con el cobre, estaño, plata y acero. Incluso en concentraciones muy bajas en el ambiente, estos gases corrosivos penetran la capa pasiva de ciertos metales y generan la corrosión. Las partículas de polvo provocan un fuerte decaimiento de la resistencia a la corrosión de los metales por su adherencia en la superficie y su capacidad de absorber agua y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Estas partículas contienen contaminantes adheridos como cloruros, que rompen la capa pasiva que protege la superficie iniciando los procesos de corrosión.

La plata es muy sensible a presencia de H_2S y de SO_2 , formando sulfuro de plata, en la superficie al reaccionar con H_2S el cual está presente en el medio ambiente, incluso en concentraciones menores a 1 (ppm). Estos contaminantes provenientes de emanaciones industriales y de los gases de escape de automóviles.

La mayor parte de los estudios publicados, relacionados al deterioro que por corrosión sufren los equipos y dispositivos electrónicos, se han orientado a las condiciones encontradas en países desarrollados [10,11,14,18,6,35], en particular EUA, Canadá, la Unión Europea y Japón (figura 3.1). Los cuales representan el mayor porcentaje de consumo de productos electrónicos. Sin embargo, la importancia que la electrónica tiene es innegable, razón por la que existe un porcentaje, cada día creciente, de equipo en todo el espectro tecnológico que es puesto en servicio en países de las llamadas economías emergentes.

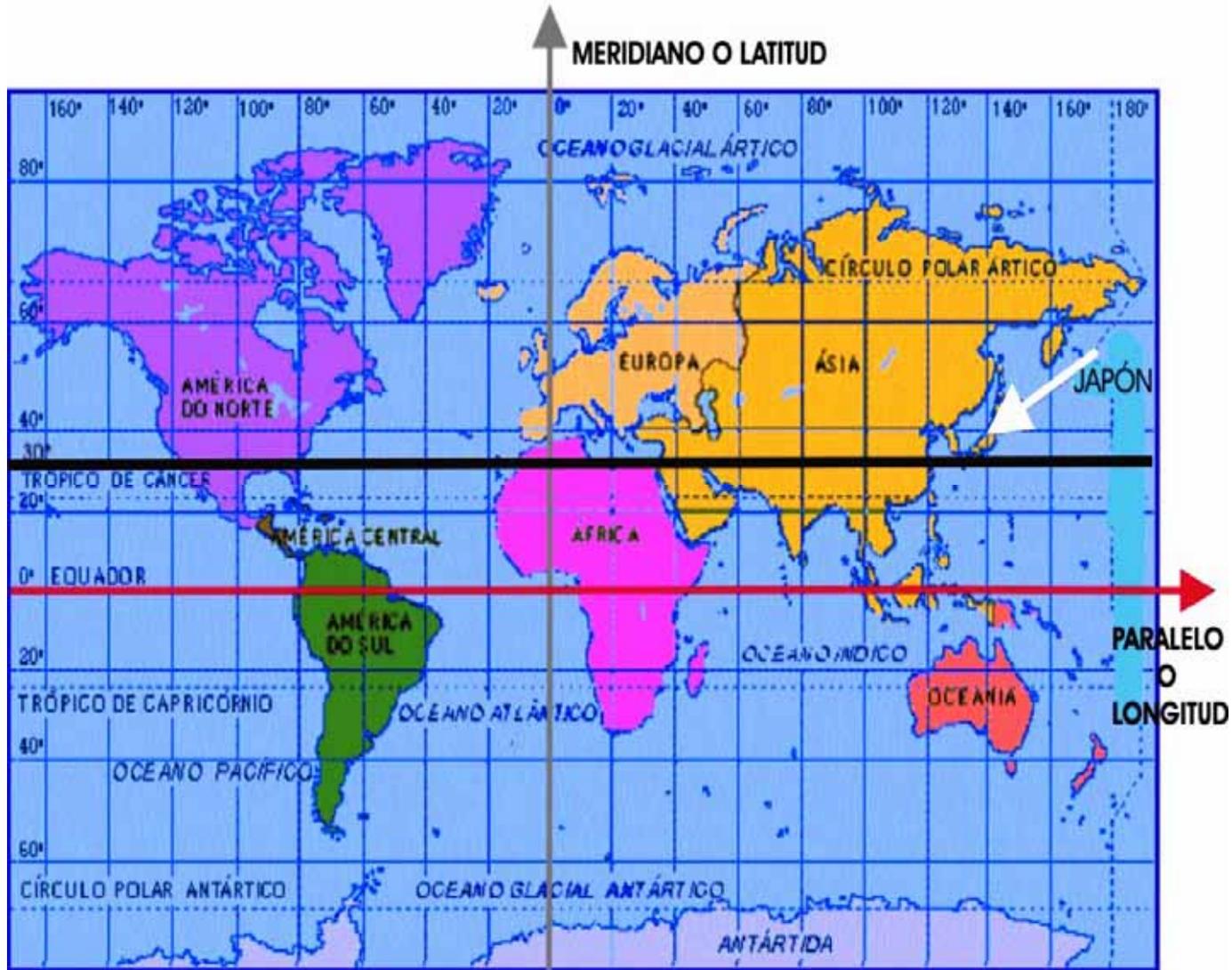


Figura 3.1. Latitudes y longitudes de acuerdo al meridiano de Greenwich [36].

Tabla 3.1. Emisiones totales de contaminantes atmosféricos más comunes en los países desarrollados [37].**

Ciudad	Índice							
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Montreal, Canadá								
Bióxido de Azufre	100	66	80	66	75	67	ND	ND
Bióxido de Nitrógeno	100	91	68	81	74	67	ND	ND
Partículas ^a	100	103	103	92	94	92	ND	ND
Nueva York, Estados Unidos de América								
Bióxido de Azufre	100	96	87	76	80	59	62	59
Bióxido de Nitrógeno	100	99	97	93	100	92	97	93
Partículas ^b	100	97	87	84	94	81	87	87
Tokio, Japón								
Bióxido de Azufre	100	88	67	67	79	79	79	ND
Bióxido de Nitrógeno	100	106	103	120	116	116	113	ND
Partículas ^b	100	114	95	72	70	91	91	ND
Berlín, Alemania								
Bióxido de Azufre	100	88	63	55	41	36	33	21
Bióxido de Nitrógeno	100	108	104	100	95	86	92	86
Partículas	100	97	83	83	71	67	76	60
Madrid, España ^f								
Bióxido de Azufre	100	94	84	70	64	45	44	28
Bióxido de Nitrógeno	100	86	87	79	78	72	74	72
Partículas ^d	100	102	100	106	117	98	102	79
París, Francia ⁱ								
Bióxido de Azufre	100	88	71	54	50	46	ND	ND
Bióxido de Nitrógeno	100	108	110	117	110	104	ND	ND
Partículas ^j	100	75	45	45	38	42	ND	ND
Londres, Reino Unido								
Bióxido de Azufre	100	89	78	69	63	76	73	ND
Bióxido de Nitrógeno	100	122	110	97	97	97	94	91
Partículas ^k	100	94	78	77	62	74	68	ND
Moscú, Federación Rusa ^l								
Bióxido de Azufre	100	150	50	ND	ND	ND	ND	ND
Bióxido de Nitrógeno	100	100	100	ND	ND	ND	ND	ND
Partículas	100	109	100	ND	ND	ND	ND	ND
^a	Partículas mayores a 75 micrómetros. * Tabla 3.1 actualizada al 2002 - 2003 anexa al sumario*							
^b	Partículas menores a 10 micrómetros.							
^c	Información actualizada por SEMARNAP, INE, 1999. Se refiere a datos de la zona metropolitana de la ciudad.							
^d	Los datos se refieren a PM10.							
^e	Partículas menores a 100 micrómetros.							
^f	El número de estaciones de monitoreo difiere cada año. Para el caso de medición de Óxido de Azufre (SOx), el dato se refiere al centro de la ciudad.							
^g	Los datos corresponden a sitios de tráfico cercanos al centro de la ciudad.							
^h	Se refiere a Partículas Suspendidas Totales (PST) y las mediciones corresponden al centro de la ciudad.							
ⁱ	Se refiere sólo a la aglomeración de París.							
^j	Sólo sitios urbanos.							
^k	El dato se refiere a humo negro.							
^l	El método de medición puede no ser el más exacto, por lo que estos datos deben utilizarse con mucha precaución.							
ND	No disponible.							

Las condiciones climáticas en los países desarrollados (localizados por arriba del paralelo 30 de latitud norte) son en general más agresivas (temperaturas máximas y mínimas) y sensiblemente diferentes a las típicas de las economías emergentes (humedad relativa, precipitación pluvial), así mismo los índices de contaminación (concentraciones de NO_x , SO_2 , CO_2 , H_2S , NH_3 , O_3 , entre otros), son diferentes en virtud de las políticas ambientales de mayor laxitud aplicadas en general en las economías emergentes. Los mayores índices de contaminación se presentan en general en mega ciudades (localizados por abajo del paralelo 30 de latitud norte) del tercer mundo.

Dadas las variaciones climáticas, características de las regiones ubicadas al norte del paralelo 30, en éstas es común el empleo de sistemas de acondicionamiento de aire, situación que atenúa sensiblemente la agresividad de las atmósferas interiores [6,35]. Por su parte, en los países en vías de desarrollo, no es extensivo el empleo de instalaciones de aire acondicionado. Además en estos casos existe un importante intercambio de aire con el exterior, situación que se traduce en características mucho más agresivas de la atmósfera en la cual se encuentra instalado el equipo electrónico.

Todas estas circunstancias dan como resultado que muchas de las conclusiones y definiciones que se han desarrollado para la instalación de equipo y dispositivos electrónicos en países desarrollados no apliquen para las situaciones características de países como México. Es por tanto necesario realizar los estudios que permitan definir el deterioro característico para las condiciones medio ambientales de diversas regiones de la República Mexicana.

Una vez definido el elemento patrón (aparatos telefónicos de uso residencial) sobre el cual se realizará el estudio se procedió a definir las localidades de las cuales provendrán los respectivos especímenes. Para esto se consideró la clasificación climática [38], el mapa de corrosividad atmosférica [32], los datos de las estaciones de monitoreo del aire publicados [39], así como los datos del INEGI [40].

Definida la muestra sobre la cual se realizará el estudio, es necesario proponer la metodología que permita obtener conclusiones en cuanto al deterioro que sufre el equipo y dispositivos electrónicos bajo las diversas corrosividades características de México [32].

Es conveniente mencionar que en México solo se realizan estudios consistentes, de la calidad del aire, en 11 ciudades e identidades federativas (tabla 3.2).

Considerando los parámetros que mayor influencia tienen en la corrosión atmosférica [7,8, 32] y en particular en el deterioro del equipo electrónico [10,12,14,16,17,33], de la definición de los diferentes tipos de atmósferas y tomando en cuenta los climas que principalmente se encuentran en México, se definieron las localidades de las que se capturarían los especímenes (tabla 3.3). Para esto también se consideró la factibilidad de contar con los datos climáticos que se mencionó tanto en el capítulo I y II (figuras 3.2, 3.3 y 3.4) y de los contaminantes más comunes de la región monitoreada.

Dada la variabilidad que se puede tener en las diferentes localidades, los tiempos requeridos para el estudio de cada muestra (tarjeta del aparato telefónico) y con la finalidad de garantizar la confiabilidad en los datos obtenidos se analizaron lotes de 3 a 5 aparatos para cada una de las localidades seleccionadas.

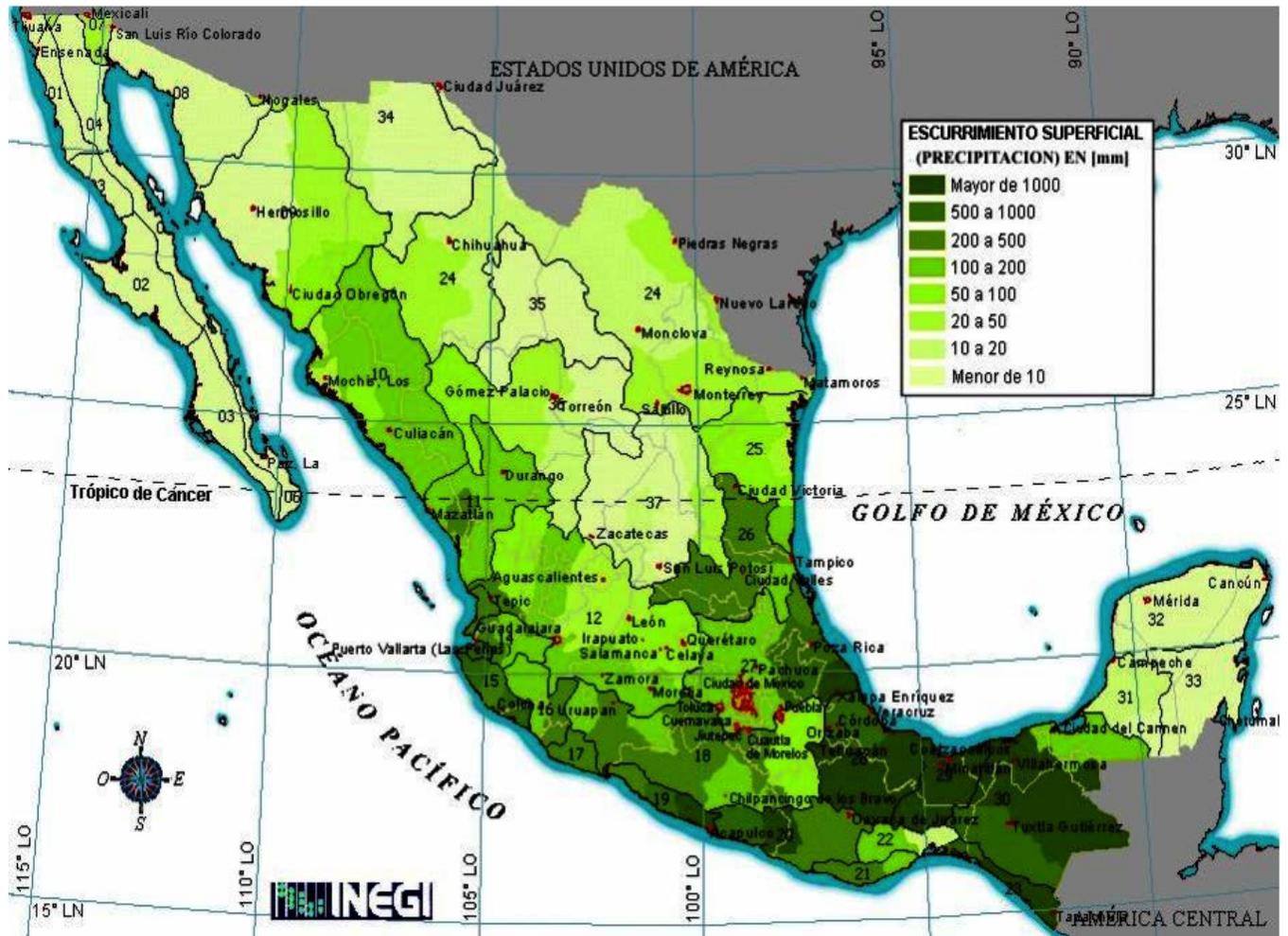


Figura 3.2. Precipitación anual en la República Mexicana [41].



Figura 3.3. Temperatura media semestral (Enero a Julio) en la Republica Mexicana [47].



Figura 3.4. Temperatura media semestral (Julio a Diciembre) en la Republica Mexicana [42].

Tabla 3.2. Principales estaciones de monitoreo y contaminantes monitoreados en 1998 [43].**

Entidad federativa	Ciudad	Contaminantes monitoreados						
		O ₃	CO	SO ₂	NO ₂	NO _x	PM10	PST
Aguascalientes ^a	Aguascalientes	ND	1.0	1	1	1	ND	2
Baja California ^b	Tijuana	4	4.0	4	4	ND	6	ND
Baja California ^b	Mexicali	4	4.0	4	4	ND	6	ND
Chihuahua ^b	Ciudad Juárez	3	3.0	ND	ND	ND	6	ND
Distrito Federal ^c	Zona Metropolitana del Valle de México	19	24.0	26	18	18	10	12
Jalisco	Zona Metropolitana de Guadalajara	8	8.0	8	8	8	8	ND
Jalisco ^d	Manzanillo	ND	ND	3	3	3	3	3
México ^a	Zona Metropolitana del Valle de Toluca	5	4.0	7	7	ND	7	5
Nuevo León	Zona Metropolitana de Monterrey	5	5.0	5	5	ND	5	ND
Querétaro ^a	Querétaro	ND	ND	6	ND	ND	ND	6
San Luis Potosí ^a	San Luis Potosí	ND	ND	10	ND	ND	ND	9
Sonora	Cananea	ND	ND	5	ND	ND	ND	ND
Sonora ^b	Cumpas	ND	ND	4	ND	ND	4	ND
Sonora	Nacozeni	ND	ND	6	ND	ND	ND	ND
Sonora ^b	La Colorada	ND	ND	ND	ND	ND	2	ND
Sonora ^b	Nogales	ND	ND	ND	ND	ND	1	ND
Veracruz de Ignacio de la Llave	Coatzacoalcos	1	1.0	ND	1	ND	ND	ND
a	Para PST los muestreos son manuales y en Querétaro también para SO ₂ .							
b	Para PM10 los muestreos son manuales.							
c	A la fecha de este reporte funcionan solamente 12 estaciones.							
d	Para PM10 y PST se desconoce si es manual o automático el monitoreo.							
ND	No disponible * Tabla 3.2 actualizada al 2005 - 2006 anexa al sumario*							

3.3. ANÁLISIS DEL DETERIORO EN APARATOS TELEFÓNICOS DE TIPO RESIDENCIAL

Como condición primordial para el desarrollo del presente estudio fue necesario definir un procedimiento para el análisis para la comprobación del grado de deterioro de equipo y dispositivos electrónicos (figura 3.5). Consistió en la inspección de tarjetas a 1X y 30X (estereomacroscopio), con la finalidad de determinar diferencias en el grado de deterioro en los diversos componentes, permitiendo así la construcción de mapas de corrosión o ataque. Definidas las zonas críticas se procedió a seccionarlas para su inspección con auxilio del microscopio electrónico de barrido (SEM), así como para la caracterización de los depósitos formados, esto mediante EDS (energy dispersive X-ray spectrometry). Lo anterior permitió definir los contaminantes críticos para cada condición y dispositivo bajo estudio (conectores, interruptores, batería, potenciómetros). Esta técnica si bien resultó muy demandante en tiempo y recursos de microscopía electrónica, permitió definir con relativa precisión los contaminantes que mayor efecto tienen en el deterioro del equipo y dispositivos electrónicos, esto de acuerdo a la región y peculiaridades de empleo.

El análisis de las tarjetas y la determinación de las características del deterioro se realizó con base en la metodología de análisis de falla [44], con la intención de proponer mejoras que garanticen una disminución del deterioro (en el equipo electrónico).

Con base en lo antes expuesto se obtuvieron los resultados que también sirvieron para contrastar con lo observado a partir de los especímenes que fueron sometidos a ensayos de deterioro acelerado.

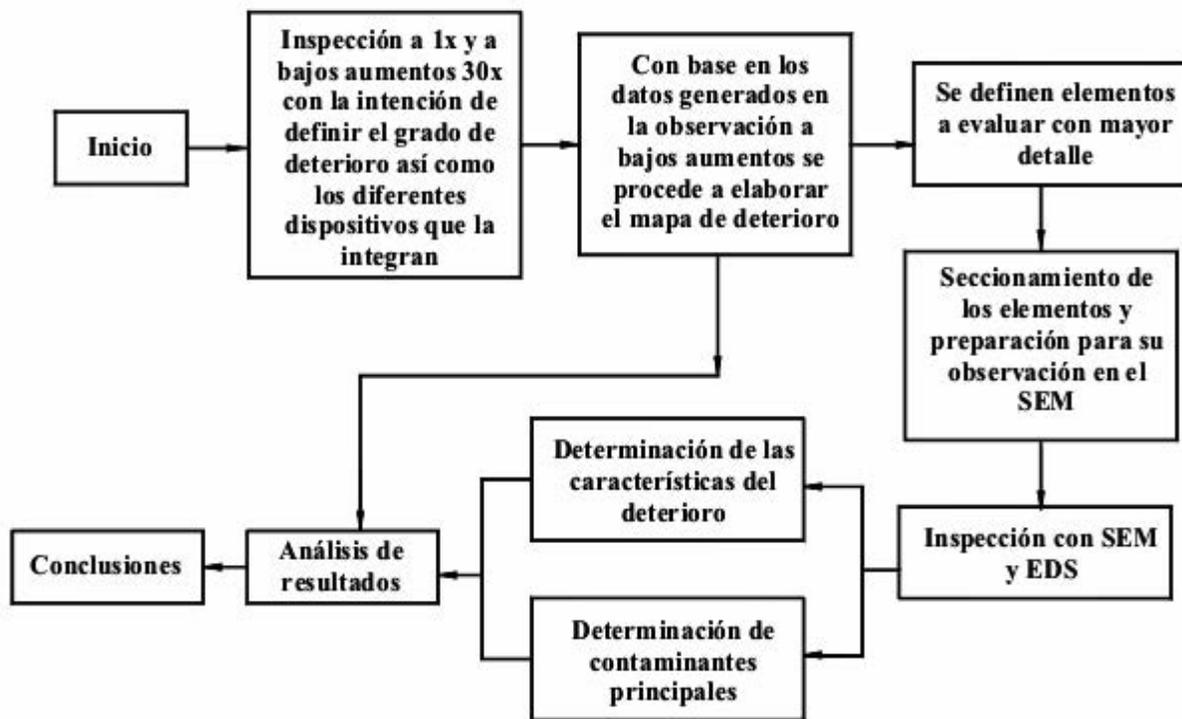


Figura 3.5. Análisis para el estudio de las tarjetas electrónicas procedentes de equipo telefónico de uso residencial [9].

El procedimiento permite analizar el deterioro que sufren las tarjetas electrónicas que estaban expuestas a un ambiente real, lo cual a su vez permite validar los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio de tipo acelerado. Los resultados permiten definir algunas modificaciones en el diseño y la manufactura para favorecer el rendimiento del dispositivo como consecuencia de evitar el deterioro ambiental. Asimismo éstos representan una muestra evidente de la importancia que las condiciones climáticas y la agresividad del medio tropical o subtropical tienen en comparación de los climas fríos y templados.

Los trabajos publicados normalmente refieren la corrosividad del ambiente, tanto en exteriores como en interiores, a partir de pruebas de larga duración realizadas en laminillas metálicas (cupones). Sin embargo, las condiciones en que se desarrollan los mecanismos de corrosión en éstas poco o nada tienen que ver con lo que sucede al nivel de un dispositivo o

tarjeta electrónica, lo cual vuelve necesario el estudio de éstos elementos para poder generar conclusiones que sean directamente aplicables.

La problemática del deterioro ambiental en equipo electrónico se debe, además de la compleja interacción de los factores que en ésta intervienen, a que en la mayoría de los casos, no existe ninguna documentación causa-efecto situación que en el análisis presentado es detallada.

Tabla 3.3. Características climatológicas de las zonas geográficas para las cuales se analizó el deterioro de teléfonos de uso residencial [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52 y 53].

<i>Localidad</i>	<i>Ubicación [79]</i>	<i>Características climatológicas [9]</i>	<i>Tipo de Atmósfera</i>	<i>Contaminantes presentes</i>
Celaya, Guanajuato (CEG)	Al norte 21° 52', al sur 19° 55' de latitud al este 99° 41', al oeste 102° 09' de longitud oeste	Para los diferentes climas (figura 3.6), precipitación 690.3 (mm), temperatura media anual 18°	Urbano - Rural	partículas suspendidas totales (PST), el Monóxido de Carbono (CO), el Dióxido de Carbono (CO ₂), los óxidos de Nitrógeno (NO _x), el bióxido de azufre (SO ₂), el Ozono (O ₃), los compuestos orgánicos volátiles (COVS), etc.
Morelia, Michoacán (MOM)	Al norte 21° 40', al sur 20° 01' de latitud norte; al este 99° 03', al oeste 100° 36' de longitud oeste.	Para los diferentes climas (figura 3.7), precipitación 780.2 (mm), temperatura media anual 18.6°	Urbano-Rural	Ácido cianhídrico, Ácido fluorhídrico, Ácido sulfhídrico, Amoniaco, Butadieno, Oxido de etileno, Oxido nítrico, Ozono, Tricloruro de boro, Etano, Dióxido de nitrógeno, Cloruro de hidrógeno, Cloro, etc.
Querétaro, Querétaro (QUQ)	Al norte 20°24', al sur 17°55' de latitud norte; al este 100°04', al oeste 103°44' de longitud oeste.	Para los diferentes climas (figura 3.8), precipitación 548.0 (mm), temperatura media anual 18.7°	Urbano - Rural	SO ₂ PST (partículas suspendidas totales)



Figura 3.6. Características climatológicas del estado de Guanajuato [50].

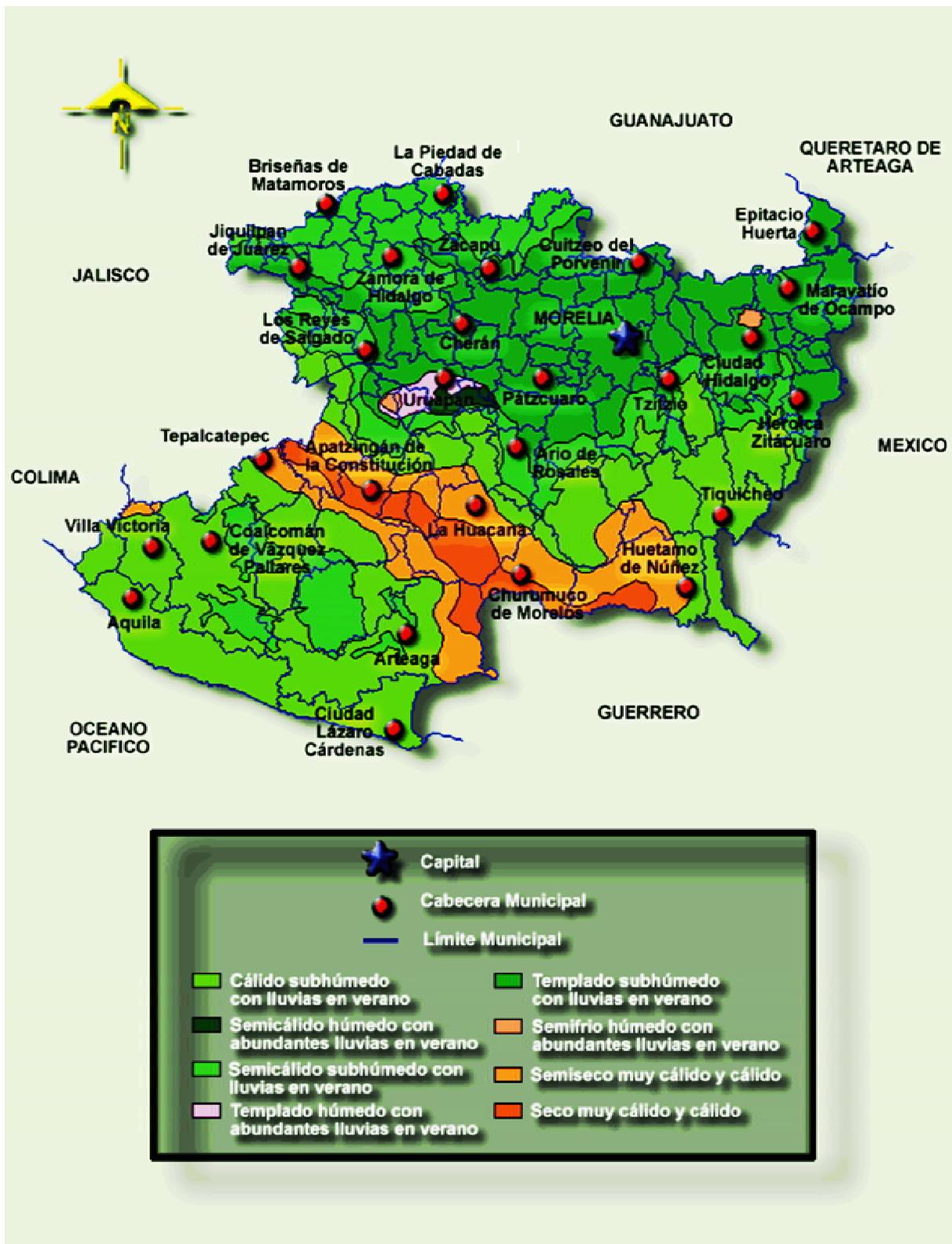


Figura 3.7. Características climatológicas del estado de Michoacán [51].

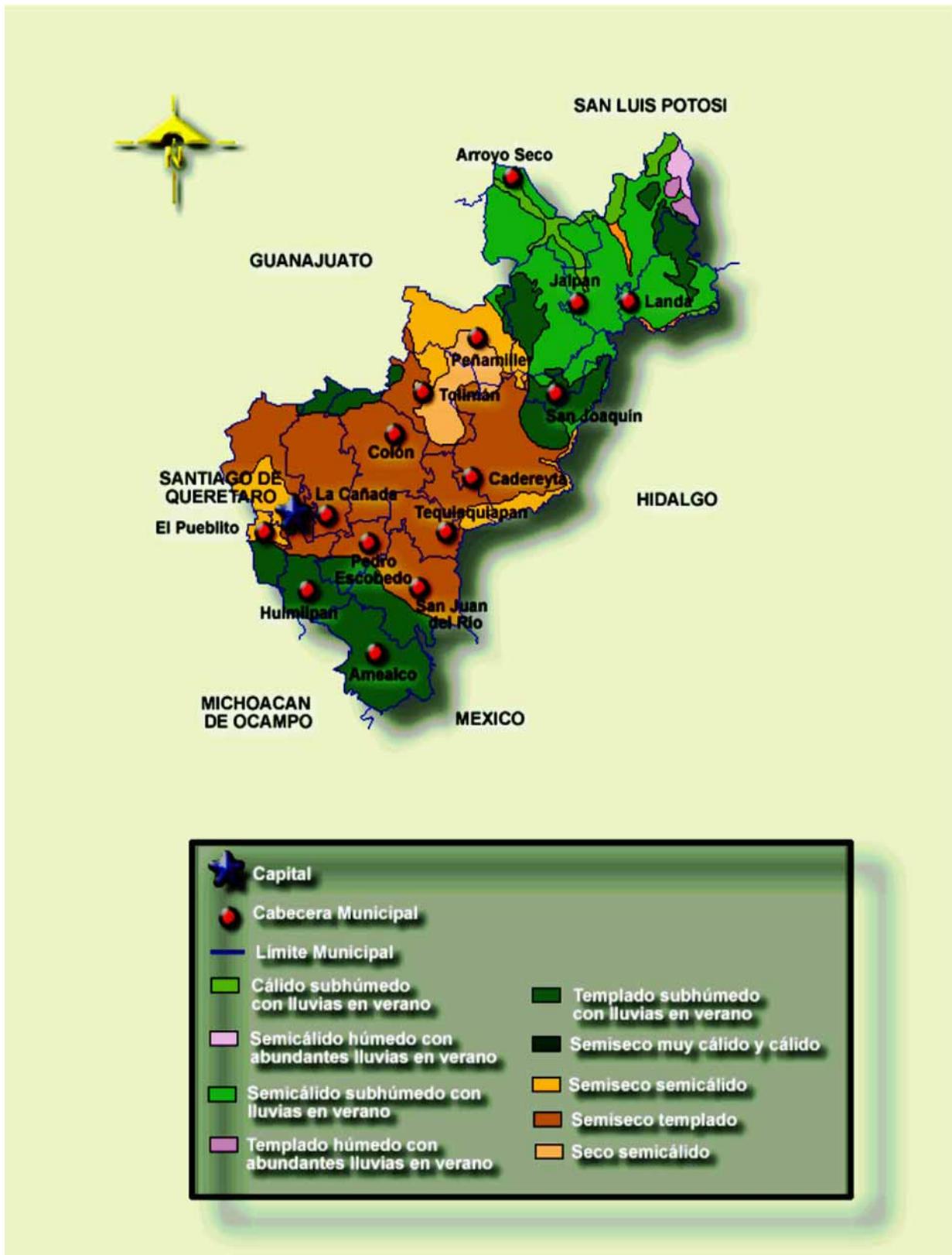


Figura 3.8. Características climatológicas del estado de Querétaro [54].

PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DE DETERIORO

Todos los aparatos, una vez desarmados, fueron revisados a simple vista. Esto en lo que se refiere a sus conexiones y tarjetas, para posteriormente realizar una detallada inspección con el estereoscopio. Los elementos con aparente deterioro (formación de depósitos) fueron inspeccionados por microscopia electrónica, y los depósitos se analizaron por EDS.

Para facilitar la interpretación de los resultados se diseñaron mapas de deterioro (figura 3.9), definiéndose cinco niveles de ataque en los componentes:

1. Depósito ligero de solución o de sales sin evidencia de corrosión
2. Depósito importante de solución o de sales sin evidencia de corrosión
3. Leve evidencia de corrosión
4. Presencia de productos de corrosión, abundantes picaduras, presencia indiscutible de fenómenos corrosivos
5. Daños importantes debidos a la corrosión, la integridad de los elementos es afectada en forma notoria.

Los niveles 1 y 2 no significan la existencia de daños por corrosión pero si representan una situación previa al ataque, del nivel 3 al 5 existe corrosión, representando este último una condición inminente de falla.

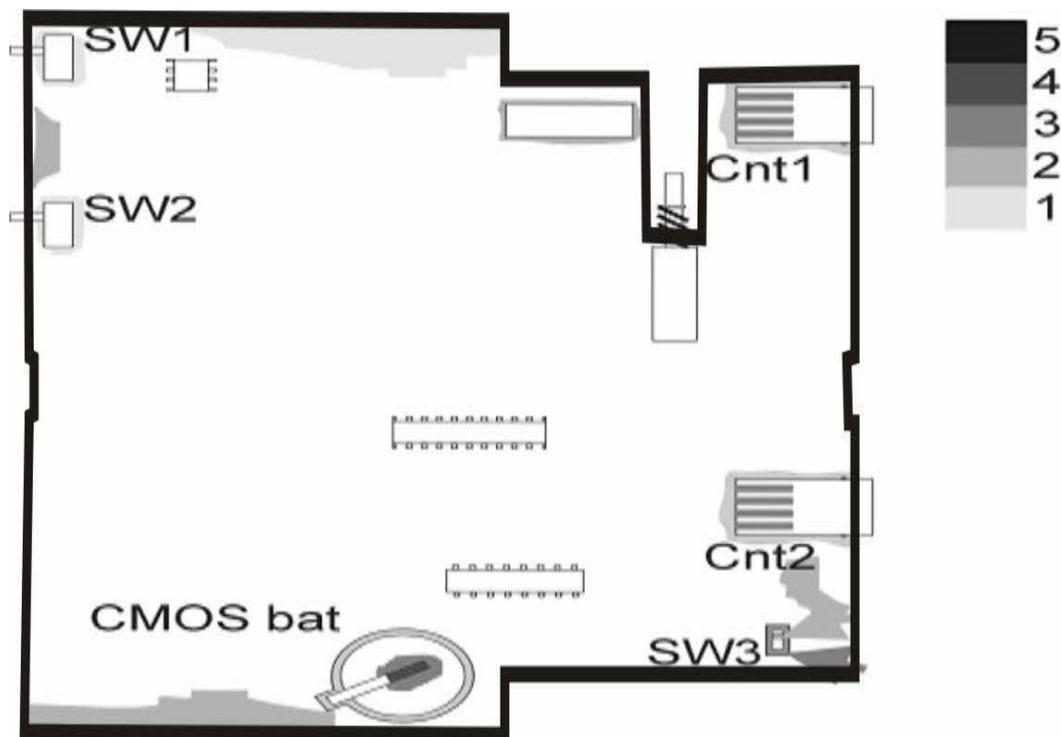
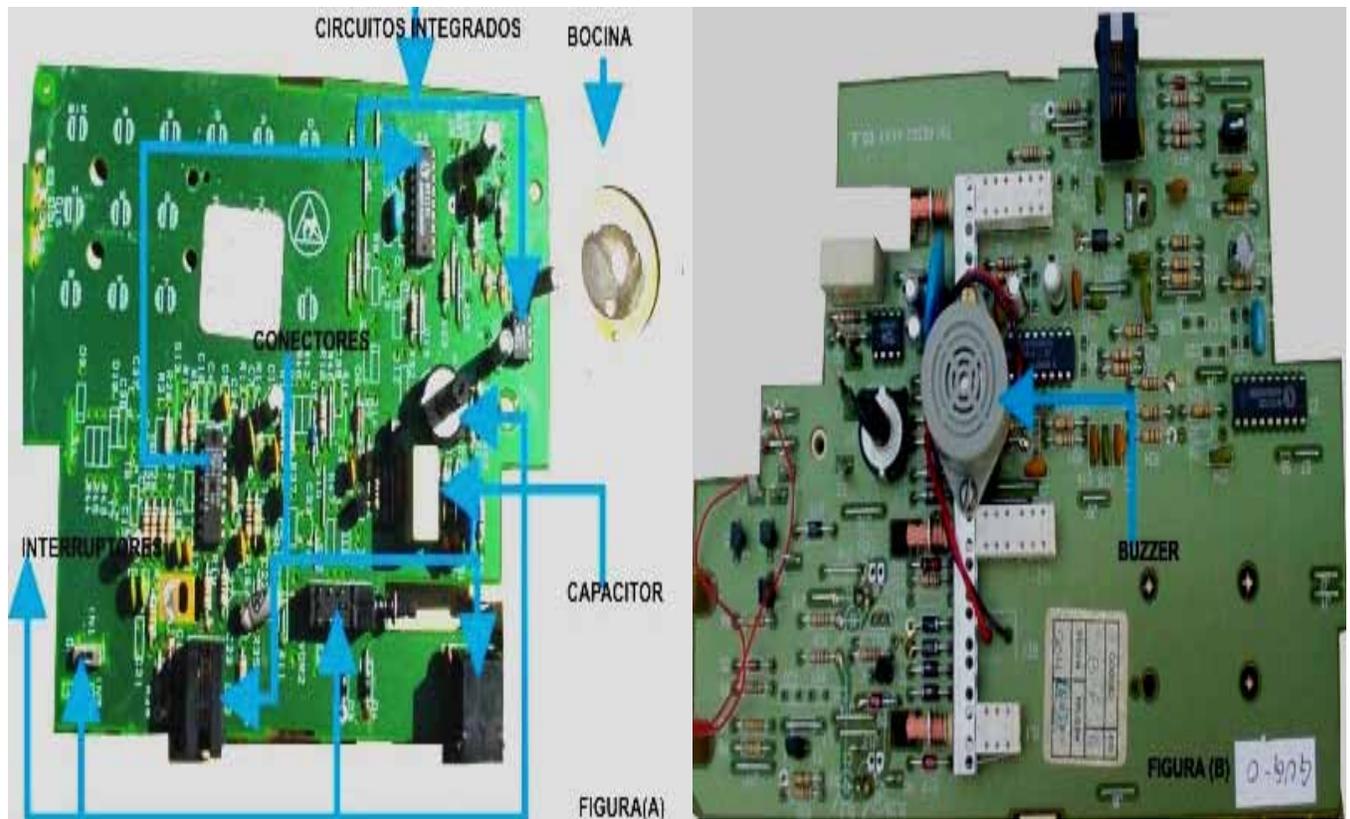


Figura 3.9. Mapa de deterioro típico para una tarjeta impresa de un teléfono de uso residencial [9].

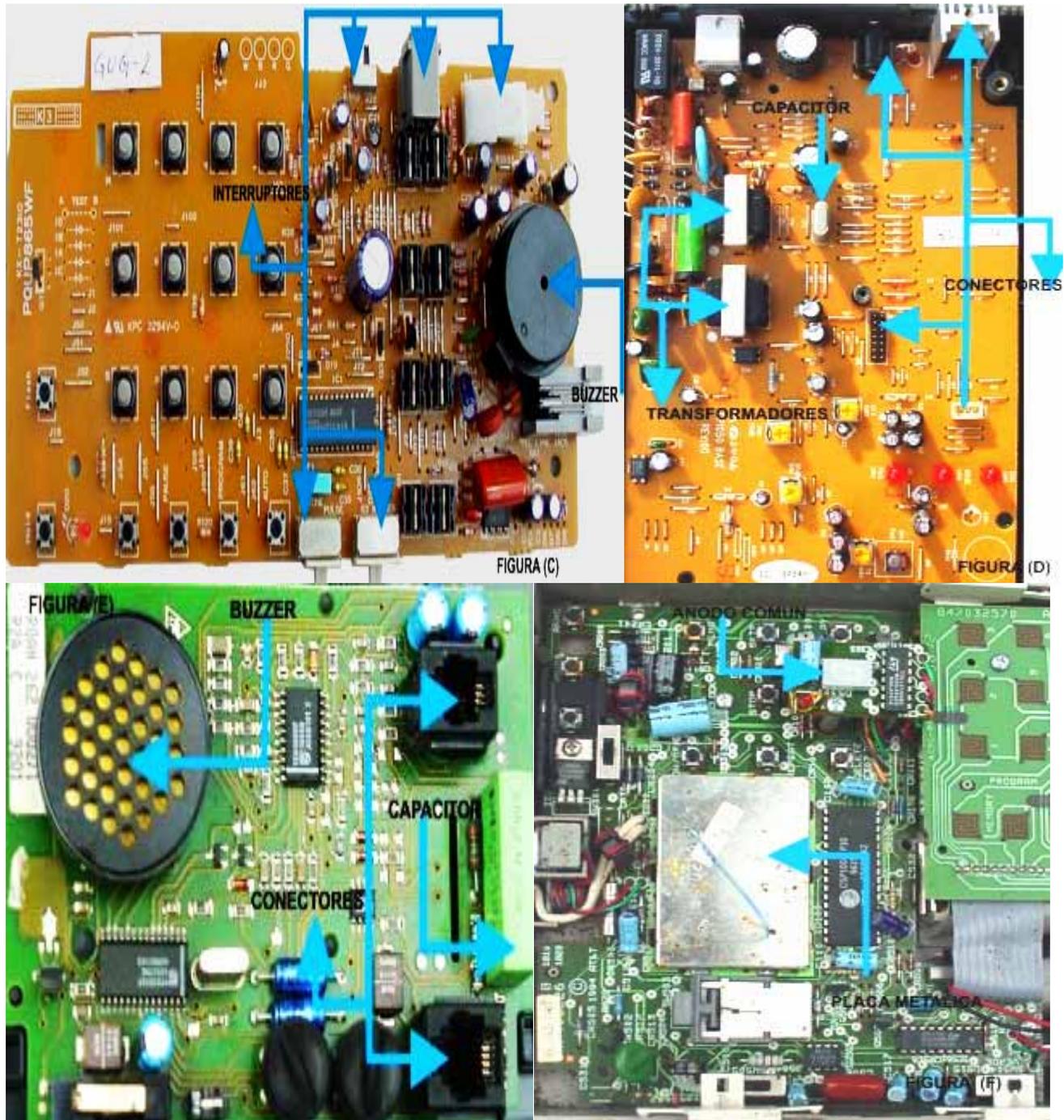
En la tabla 3.4 se describe la procedencia de los equipos telefónicos que se estudiaron.

Tabla 3.4. Características de los equipos telefónicos sobre el cual se realizó el estudio.

Clave de identificación	Localidad de procedencia	Descripción de Zona de servicio	Años de servicio
CEG-4	Celaya	Casa habitación	Menor a 5 año
CEG-5	Celaya	Casa habitación	Menor a 5 año
CEG-6	Celaya	Casa habitación	Menor a 5 año
CEG-7	Celaya	Casa habitación	Menor a 5 año
CEG-8	Celaya	Casa habitación	Menor a 5 año
CEG-9	Celaya	Casa habitación	Menor a 5 año
CEG-10	Celaya	Casa habitación	Menor a 5 año
MOM-5	Morelia	Casa habitación	Menor a 5 año
MOM-6	Morelia	Casa habitación	Menor a 5 año
MOM-7	Morelia	Casa habitación	Menor a 5 año
MOM-8	Morelia	Casa habitación	Menor a 5 año
MOM-9	Morelia	Casa habitación	Menor a 5 año
QUQ-6	Querétaro	Casa habitación	Menor a 5 año
QUQ-7	Querétaro	Casa habitación	Menor a 5 año
QUQ-8	Querétaro	Casa habitación	Menor a 5 año
QUQ-9	Querétaro	Casa habitación	Menor a 5 año
QUQ-10	Querétaro	Casa habitación	Menor a 5 año



Figuras 3.10 A y B tarjetas impresas con sus componentes más significativos de estas [55].



Figuras 3.10 C, D, E y F tarjetas impresas con sus componentes más significativos de estas [55].

CAPÍTULO 4. ESTUDIO DEL DETERIORO SUFRIDO EN EQUIPO TELEFÓNICO INSTALADO EN LA ZONA CENTRO DE LA REPÚBLICA MEXICANA

4.1 DIAGNÓSTICO DE LAS OBSERVACIONES EN EQUIPO ELECTRÓNICO DEBIDO AL DETERIORO GENERADO POR EFECTOS AMBIENTALES

Es importante mencionar y constatar que todas las tarjetas impresas de los equipos telefónicos, tienen partes sensibles al deterioro por corrosión y cuya falla se traducirá en la incapacidad del equipo para seguir operando adecuadamente. Todos estos elementos (resistencias, capacitores, interruptores, etc) son producidos en Cu, Al y latón entre otros con Sn, Au, Ni y Ag, o aleaciones de éstos como recubrimiento.

En todos los casos estudiados los recubrimientos y las soldaduras base estaño no presentaron deterioro, se concluye en que las condiciones de exposición dan lugar a la formación de capas de pasivación. Esto se interpreta a través de la formación de cloruros, depósitos que afectan la soldabilidad pero que no se traducen en mayores daños. En general elementos tales como resistencias, interruptores, capacitores, bocinas; etc., no mostraron importante deterioro.

De los resultados es necesario mencionar que en todas las tarjetas telefónicas inspeccionadas en ninguna se observó la presencia de algún recubrimiento SnPb, debido a que la industria electrónica ha descartado, para los equipos telefónicos, seguir utilizando este tipo de recubrimientos debido a la presencia del Plomo; esto por la toxicidad asociada a dicho elemento. A cambio de lo anterior es usual la aplicación de recubrimientos de SnZn, SnNi, SnAg, ya que estos presentan mejores propiedades (conductividad y soldabilidad) que las aleaciones SnPb.

De la inspección realizada también se desprende la presencia de Au, dadas las excelentes características de éste elemento tanto en lo que se refiere a las propiedades eléctricas como en su resistencia a la corrosión.

4.2 TARJETAS PROVENIENTES DE CELAYA GUANAJUATO.

Todas las muestras correspondientes a este lote se encontraban en condiciones operativas al momento de ser retiradas de servicio, si bien en algunos casos se reportó la existencia de fallas intermitentes. El tiempo de servicio de los aparatos analizados fue de 4 a 5 años. La inspección visual mostró:

- Distribución coincidente en el deterioro.
- Distribución de depósitos de condensados coincidentes.

En esta región existe la presencia de contaminantes tanto de origen agrícola como industrial, tales como el SO_2 . Los primeros análisis muestran leve incidencia de deterioro por corrosión atmosférica, esto se observa que en algunas partes tales como los interruptores, conectores y bocinas (figura 4.1).

La ciudad de Celaya también es una de las ciudades con mayor índice de contaminación en la República por lo que es necesario mencionar los contaminantes de mayor importancia en dicha zona, entre los que destacan:

- a. partículas suspendidas totales (PST),
- b. óxidos de Nitrógeno (NO_x),
- c. Ozono (O_3),
- d. compuestos orgánicos volátiles (COVS)
- e. componentes amoniacales.

Cabe mencionar que todas estas sustancias aceleran la corrosión en presencia de otros contaminantes, mientras que se puede suponer que el cloro juega un papel de menor importancia en el proceso corrosivo.

La remoción de NO_x y ozono en forma de HNO_3 y H_2O_2 necesita la presencia de una fase acuosa, por lo que su influencia en la región de Celaya se considera prácticamente inexistente.

La acumulación de SO_2 sigue la misma lógica, con excepción de la plata, la cual se corroe en atmósferas secas. Por otro lado cabe mencionar que la ciudad de Celaya se destaca por su clima que es semiseco.

Se puede concluir que la baja humedad relativa característica de la zona del bajío se traduce en mucho menores índices de deterioro en el equipo electrónico, si bien para esto habrá que considerar la existencia de microclimas en dicha zona del bajío.

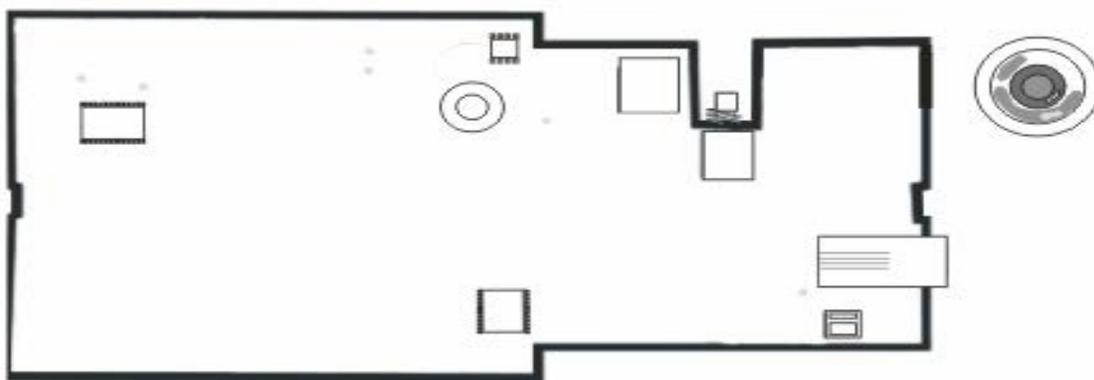


Figura 4.1. Se muestra la presencia y la distribución tanto de pequeños depósitos como también de deterioro en algunas partes (terminales, resistencias, conectores, en el resorte y en la bocina) de la tarjeta telefónica (CEG) [9].

Los resultados correspondientes al deterioro característico observado en la ciudad de Celaya, en principio, son sorprendentes, ya que fue relativamente difícil encontrar evidencia de corrosión en muchas partes de los circuitos (figuras 4.2 a 4.4).

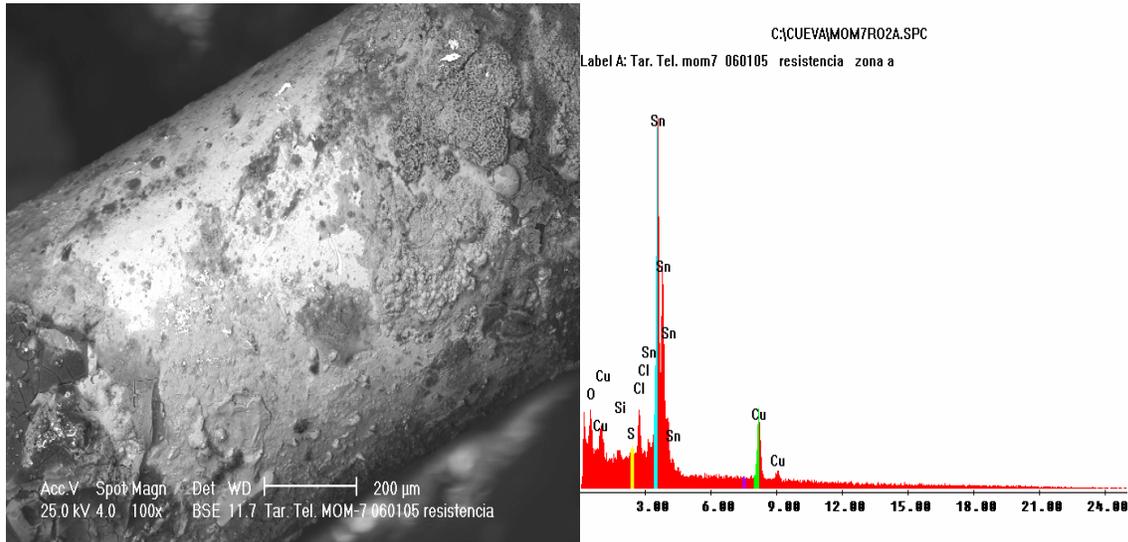


Figura 4.2A. A la vez de desprenderse la película de Estaño se forman depósitos complejos en los cuales se evidencia, de acuerdo al espectro de la figura 4.2B, la presencia de Cloro y Azufre.

Figura 4.2B. Del análisis cuantitativo de los depósitos presentados en la figura 4.2A. Se desprende el efecto que los compuestos de Cloro y Azufre tienen al revestimiento de la resistencia demasiado deteriorada.

Tabla 4.1. En el ataque de las pistas de cobre (figura 4.2A) es notable el efecto de los cloruros y sulfuros presentes en un ambiente importante de húmeda.

Elemento	Wt %	At %
O K	28.88	69.97
S K	1.01	1.22
ClK	3.16	3.45
SnL	54.64	17.84
CuK	12.31	7.51
Total	100	100

Tabla 4.2. Composición de los depósitos observados en la figura 4.3. La presencia de Cloro y Azufre se puede correlacionar con una inadecuada práctica de limpieza de los fundentes empleados en la operación de soldadura.

Elemento	Wt %	At %
O K	18.54	56.62
S K	1.3	1.98
ClK	8.06	11.11
SnL	70.35	28.96
CuK	1.74	1.34
Total	100	100

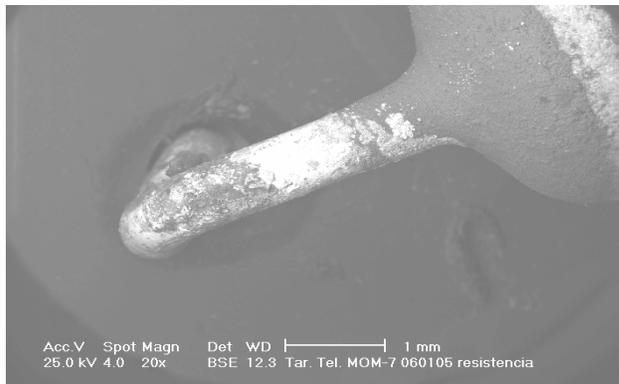


Figura 4.3. Conector de una resistencia. Se trata de un conductor de Cobre recubierto con Estaño. Los contaminantes presentes (cloruros) en combinación con una elevada humedad relativa dan como consecuencia un rápido deterioro del recubrimiento y su desprendimiento del conductor.

Tabla 4.3. La composición es muy similar a la presentada en la tabla 4.2. Por lo que se puede suponer corresponde a una región en donde el recubrimiento último fue prácticamente despreciable.

Elemento	Wt %	At %
O K	31.79	67.69
S K	1.42	1.5
ClK	4.7	4.52
SnL	28.09	8.06
CuK	34	18.23
Total	100	100

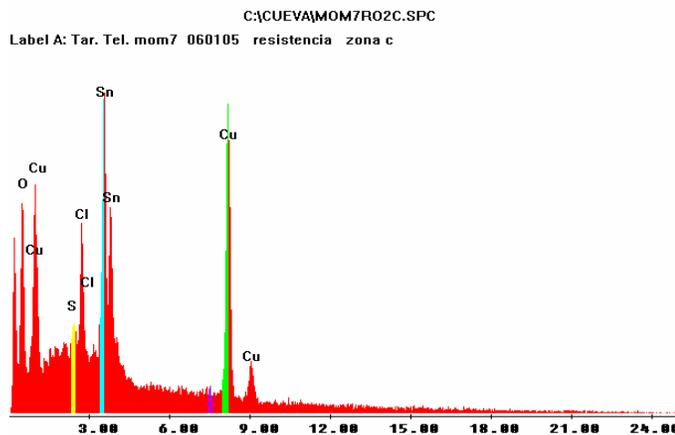


Figura 4.4. Espectro correspondiente al camino conductor de la figura 4.3.

4.3 RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN PRELIMINAR DE LAS TARJETAS TELEFÓNICAS PROVENIENTES DE MORELIA, MICHOACÁN.

Las muestras que se analizaron provenían de aparatos en uso, con 4 a 5 años de servicio. La corrosividad característica de esta región se presume, en principio, deberá ser menor que las correspondientes para las ciudades de Celaya y de Querétaro, esto en virtud de ser una zona con menor grado de contaminación atmosférica debido a la baja presencia de actividad industrial; sin embargo en contraposición su clima es templado subhúmedo y tiene precipitaciones pluviales más altas que de las ciudades de Celaya y Querétaro.

De la inspección visual se determinó que en la mayoría de las tarjetas telefónicas existe la presencia de productos de corrosión, se nota más que nada en los interruptores, conectores, buzzer, placa metálica, etc (figuras 4.5 y 4.6). Estos depósitos provienen tanto de la precipitación de compuestos de azufre como del efecto del ión Cloro, y compuestos de dicho elemento, dicha situación es contradictoria a las condiciones esperadas de contaminación.

La corrosión en la ciudad de Morelia Michoacán se concentra generalmente alrededor de partículas o sales cristalizadas, esto es una indicación de una condensación limitada e intermitente en las superficies, mientras que los contaminantes se acumulan durante la fase húmeda y se cristalizan al secarse. La presencia de sales higroscópicas o partículas de polvo que sirven como inoculantes causan la condensación en el mismo lugar durante cada ciclo de condensación-secado.

En las figuras 4.5 y 4.6 se observa el deterioro de algunos conectores de latón, los cuales se encontraban en contacto con alambres revestidos con Oro. En este caso se presenta la formación de compuestos del sustrato los cuales fluyen a través de los poros del recubrimiento de Oro. Es evidente que también existe la formación de una celda galvánica al entrar en contacto el conector de latón con el alambre dorado, situación que favorece la corrosión del latón; dando como resultado la presencia de productos de corrosión de Cobre y Zinc, en los que se manifestó también la existencia de Cloro, y cantidades menores de Azufre combinado con Oxígeno.

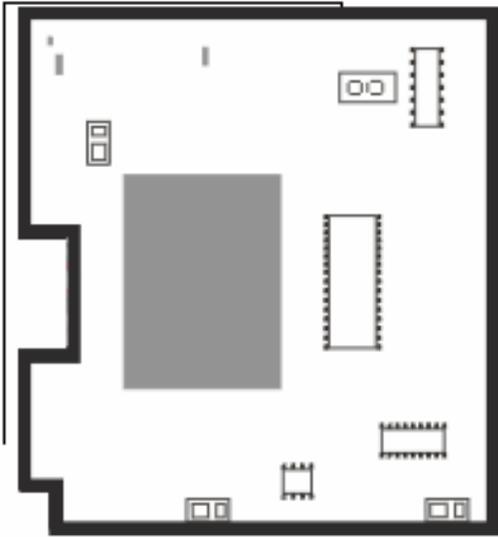


Figura 4.5. La condensación de líquidos y el deterioro de algunos elementos son más evidentes, en particular en la zona superior de la tarjeta telefónica (MOM) [9].

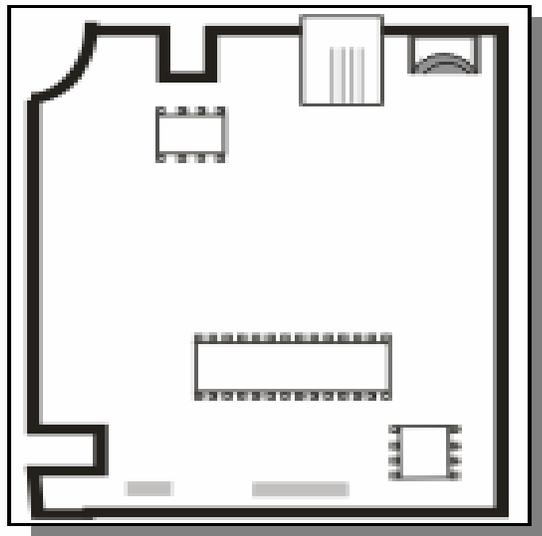


Figura 4.6. En algunas regiones de esta tarjeta se aprecian pequeños depósitos los que se evidencian con los daños más severos que se observan en los conectores así como los microcomponentes [9].

La influencia relativa del cloro y el azufre como agentes corrosivos se muestran en las figuras 4.7A a 4.10B para el caso de Morelia. Se ha observado que el estaño y el níquel están afectados principalmente por el azufre, aunque se detecta fuerte presencia de cloro en algunos productos de corrosión base estaño. El latón está más afectado por el cloro. Si estos datos se comparan con los resultados de Tampico, se observa que el azufre predomina de tal manera que elaborar una gráfica tendría poco sentido.

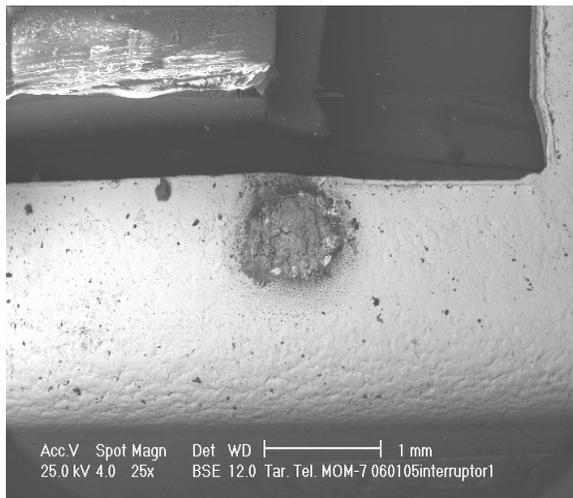


Figura 4.7A. En la carcasa de este interruptor se aprecia que el recubrimiento de Níquel se presenta deterioro.

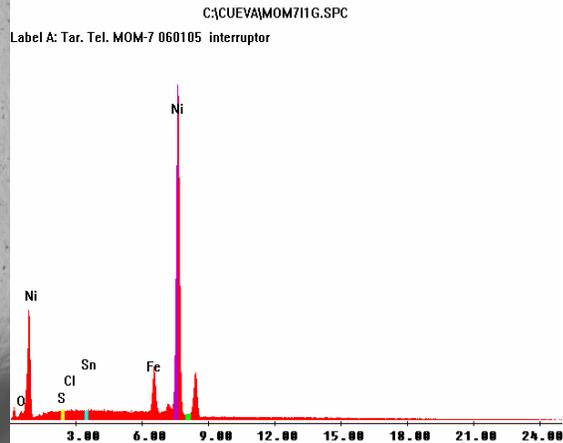


Figura 4.7B. Espectro correspondiente a los depósitos formados en el conector.

Tabla 4.4. Análisis cuantitativo de la superficie Niquelada de la figura 4.7A.

Elemento	Wt %	At %
O K	0	0
S K	0.49	0.89
ClK	0.28	0.46
SnL	0.47	0.23
FeK	6.46	6.74
NiK	92.3	91.68
Total	100	100

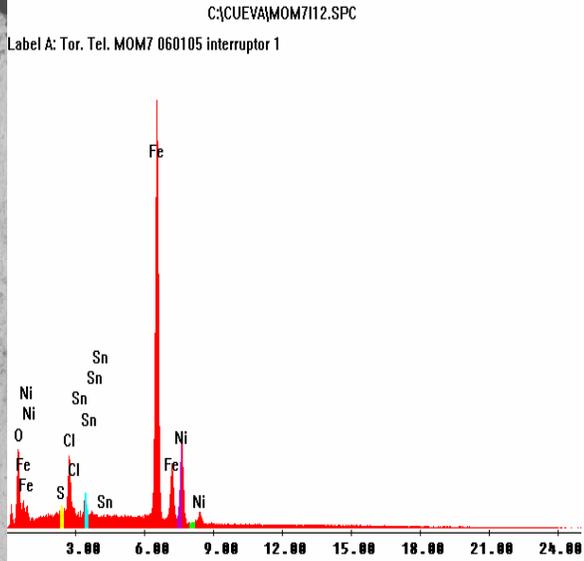
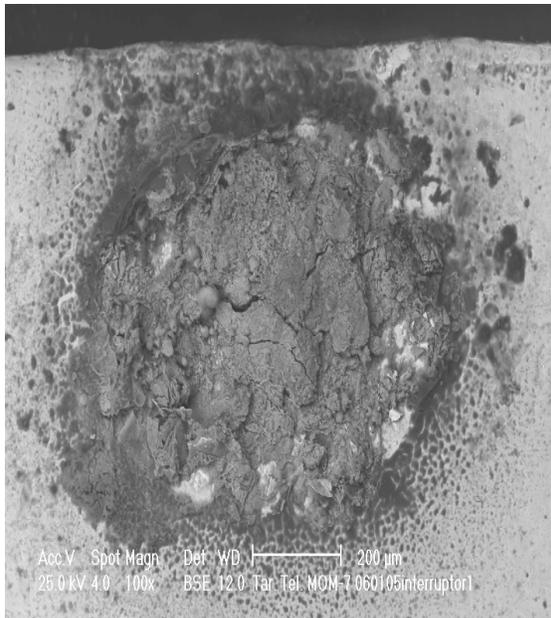


Figura 4.8A. La formación de depósitos en la superficie Niquelada es importante, sobre todo en los bordes paralelos al troquelado.

Figura 4.8B. Espectro de la superficie estañada correspondiente al interruptor.

Tabla 4.5. El análisis del espectro 4.8B se determina que para el caso de la carcaza del conector se trata de chapa de Acero Niquelada.

Elemento	Wt %	At %
O K	19.29	45.57
S K	0.9	1.06
ClK	4.69	5
SnL	5.43	1.73
FeK	53.75	36.37
NiK	15.95	10.27
Total	100	100

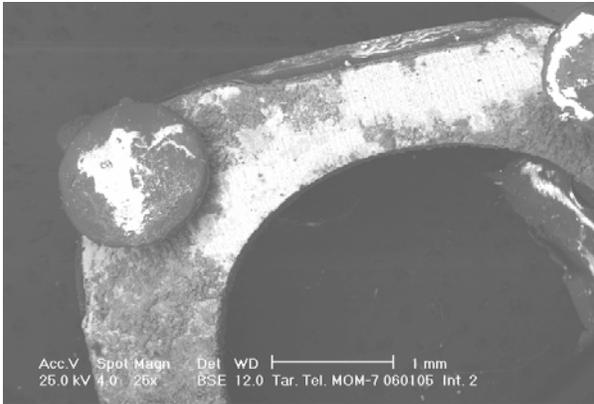


Figura 4.9A. Conector de acero de un interruptor correspondiente a una tarjeta telefónica. Resulta evidente que éste perdió su recubrimiento protector (Estaño), situación que se ha traducido en un notorio deterioro del camino conductor.

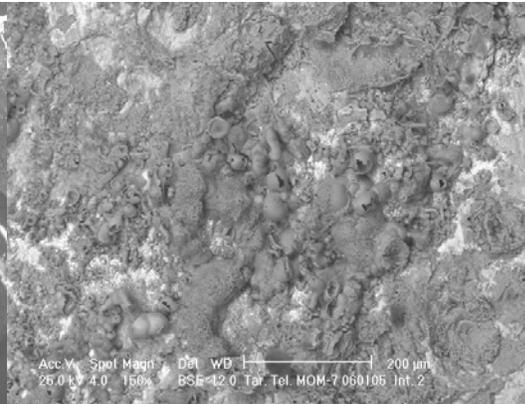


Figura 4.9B. Se observa claramente como el Estaño se desprende del material base.

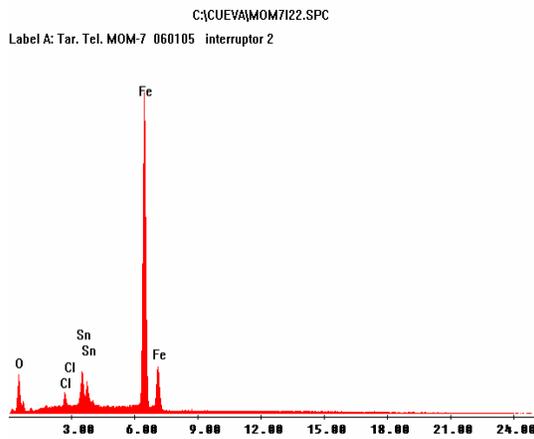


Figura 4.9C. Espectro correspondiente al recubrimiento del conector del interruptor.

Tabla 4.6. En el ataque del recubrimiento de estaño (figuras 4.9A y 4.9B), los Cloruros tienen un efecto importante sobre el interruptor.

Elemento	Wt %	At %
O K	8.85	26.31
Cl K	1.27	1.71
Sn L	10.06	4.03
Fe K	79.81	67.95
Total	100	100

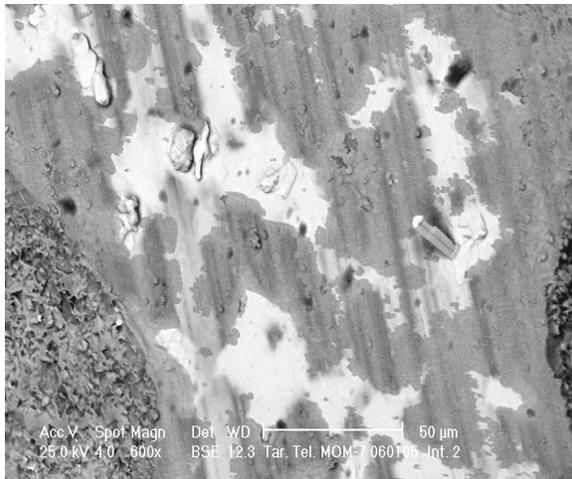


Figura 4.10A. Detalle de los depósitos que se forman en el conector del interruptor (600x). Se trata fundamentalmente de Cloruros con algunas partículas de FeO atrapadas (esto de acuerdo al espectro de la figura 4.10B).

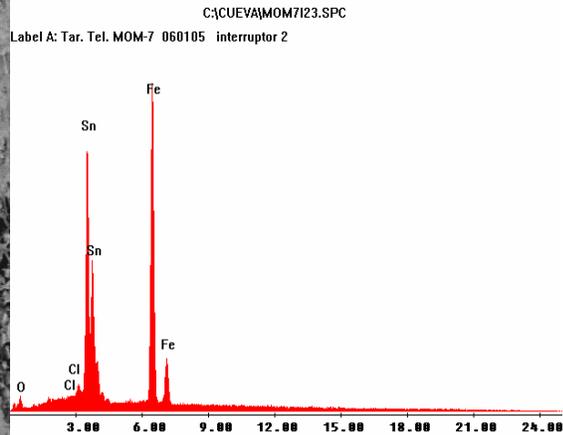


Figura 4.10B. Espectro correspondiente a una zona con baja presencia de depósitos. De acuerdo con el análisis cuantitativo (tabla 4.10.) se concluye que se trata de un depósito de níquel sobre una superficie de acero.

Tabla 4.7. Se comprueba que la superficie del interruptor ha sido Estañada, esto con la intención de mejorar su resistencia a la corrosión.

Elemento	Wt %	At %
O K	3.3	13.6
ClK	0.1	0.18
SnL	44.5	24.72
FeK	52.1	61.51
Total	100	100

4.4 RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN EFECTUADA EN TARJETAS TELEFÓNICAS PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE QUERÉTARO, QUERÉTARO.

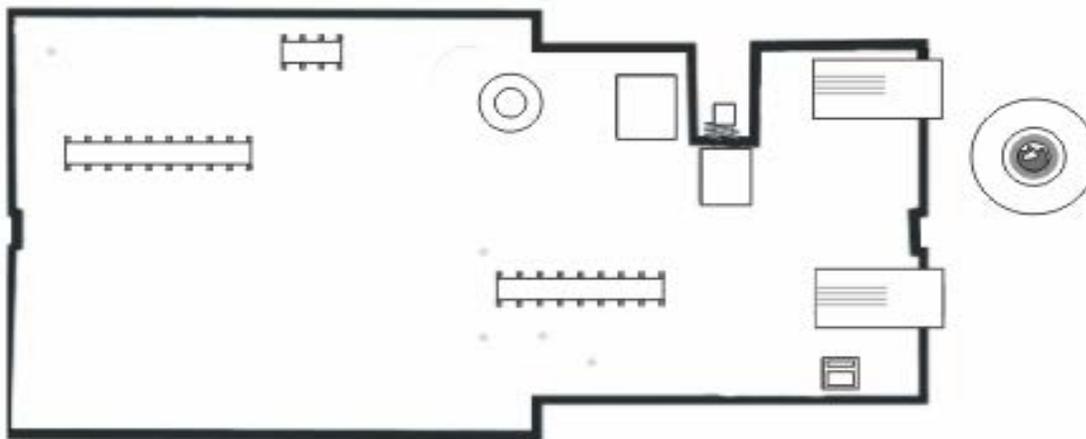
Todas estas muestras que se analizaron es este caso presentaron características de empleo similares a las correspondientes a la ciudad de Celaya.

La ciudad de Querétaro, Querétaro corresponden a la zona centro de la Republica Mexicana, la cual representa una región en donde se pueden combinar los efectos de los contaminantes provenientes de las actividades agropecuarias con los típicos de la actividad

industrial, a la vez de manifestar una fuerte influencia por fuentes móviles. Adicionalmente se debe considerar el efecto de los productos característicos de las actividades antropogénicas, ya que en este caso dichos contaminantes pueden tomar un lugar preponderante en el deterioro. Esta hipótesis se confirma con la investigación realizada a esta ciudad de Querétaro sobre los contaminantes presentes.

Una de las causas que pueden reducir la incidencia del deterioro por corrosión atmosférica en esta ciudad es su reducida humedad relativa y su baja precipitación pluvial anual, característica de un clima semiseco.

Se observó que existe leve evidencia de corrosión atmosférica sobre todo en los interruptores, conectores, bocinas (figura 4.11); así como también hay abundantes picaduras todo esto por la presencia de productos de la corrosión atmosférica en particular en las bocinas de estos equipos telefónicos.



Figuras 4.11. Esquema de un equipo telefónico en el cual, se corrobora que si existe deterioro como se observa y presenta en terminales, resistencias, conectores, en el resorte y en la bocina por corrosión atmosférica en la tarjeta telefónica (QUQ) [9].

Referente a la hipótesis propuesta de la actividad antropológica mencionada en líneas arriba se comprueba de las figuras 4.12A a 4.12D.

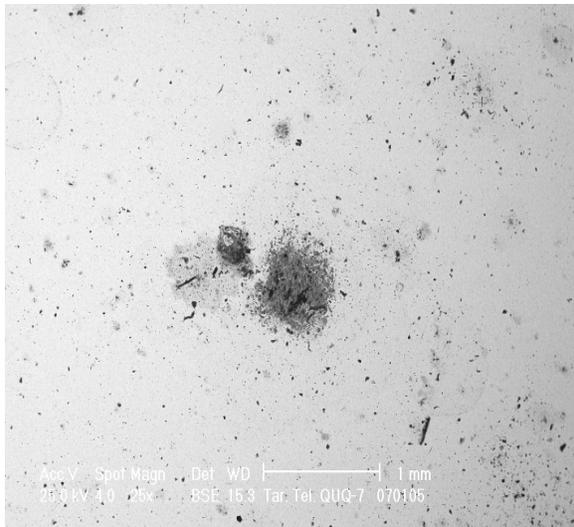


Figura 4.12A. Conector de una resistencia. Se trata de un conductor de cobre en cual se identifican los Óxidos de Zinc por su morfología.

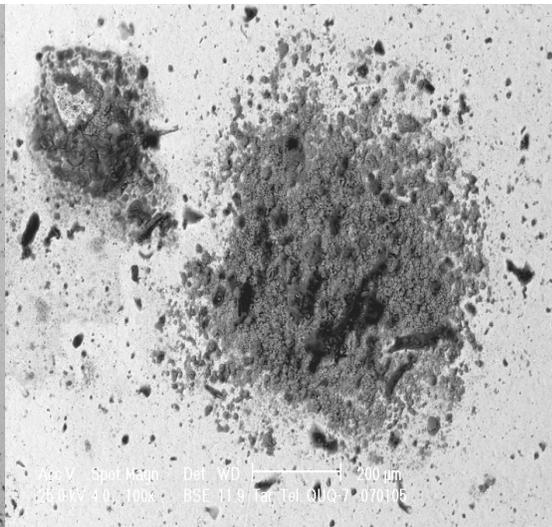


Figura 4.12B. Detalle de la imagen anterior, el ataque tiende a extenderse dada la porosidad del recubrimiento.

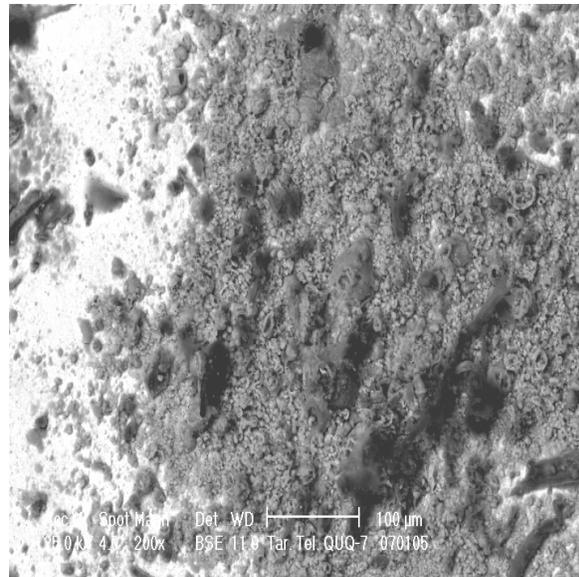
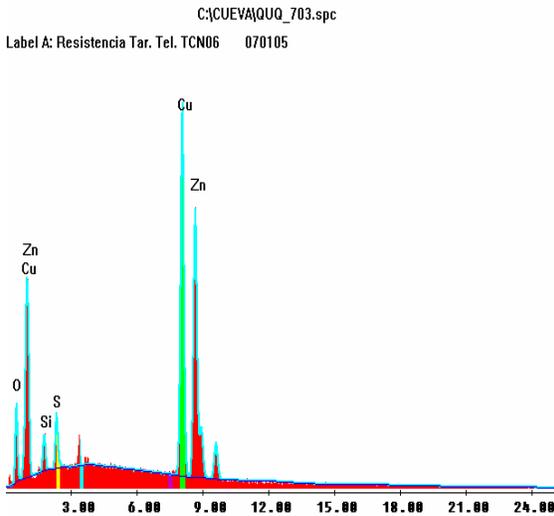


Figura 4.12C. Las estructuras que se forman son porosas y en algunos de los casos presentan un crecimiento filiforme.

Tabla 4.8. Análisis cuantitativo de los depósitos observados en la figura 4.12A.



Elemento	Wt %	At %
O K	6.63	21.34
SiK	2.12	3.89
S K	2.22	3.56
CuK	47.8	38.74
ZnK	41.23	32.48
Total	100	100

Figura 4.12D. Espectro del depósito formado en la resistencia.

4.5 COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

En particular, los métodos planteados para los equipos telefónicos para el estudio de la Corrosividad no proporcionaron detalles con relación a la naturaleza exacta de los mecanismos involucrados en el deterioro, pero si arrojaron información valiosa con relación a la problemática, y permitieron generar conclusiones que favorecen la definición de acciones preventivas, a la vez de precisar condiciones críticas de exposición. Por otra parte, los análisis significan una primera aproximación en cuanto a los inconvenientes, que por corrosión se presenta en el equipo electrónico, esto en los diferentes climas de la Republica Mexicana.

La metodología propuesta para el análisis del deterioro por Corrosión Atmosférica en aparatos telefónicos ha permitido determinar que, para las ciudades en estudio, los siguientes agentes aceleran este proceso, estos son; dióxido de azufre (SO₂) y ión Cloro (Cl⁻); todo esto ante la presencia de una humedad relativa mínima.

Es necesario enfatizar que el grado de contaminación ambiental por los diversos contaminantes que se generan o se producen en estas 3 ciudades no representa una característica fundamental e importante en la Corrosividad de dispositivos electrónicos observados, ya que en particular el lote de aparatos que se analizaron no se logro encontrar un deterioro importante respecto a este punto en dichas tarjetas telefónicas, todo esto se debe a que en estas regiones no existen los contaminantes en la atmósfera para provocar este fenómeno corrosivo la que si se considera como una variable importantísima para el caso del deterioro de los equipos telefónicos es la humedad relativa, ya que además la presencia de condensado puede producir fallas intermitentes del sistema aún antes de que la corrosión origine daños.

También es necesario mencionar que todos los estudios o los análisis que se realizaron a estas tarjetas telefónicas tanto en las ciudades de Celaya como la de Morelia y la de Querétaro; en cada una de estos aparatos se obtuvo que en ellas existe el mismo tipo de atmósfera es decir la urbana rural y la urbana industrial, pero en ningún caso de estas tres ciudades se le consideró como crítica a la Corrosión Atmosférica considerando que en ellas no son tan altos sus niveles de contaminación referente a los índices del Imeca.

Cabe mencionar la inspección que se desarrolló en estos aparatos telefónicos generó y proporcionó una valiosa información en cuanto a las ventajas que hay sobre el diseño (con respecto a los recubrimientos que se utilizan como son el Níquel, el Estaño, etc, estos metales son efectivos, con algunas excepciones, para retardar la presencia de los inconvenientes por causa de la Corrosión), además de permitir precisar que la Corrosividad afecta o daña mas a algunos componentes electrónicos a los que se les considera como componentes críticos entre los que se encuentran (interruptores, conectores, microcircuitos) que en todos estos equipos persistió o se constató un posible daño debido o provocado por la Corrosión Atmosférica ya sea en mayor o menor grado.

Bajo estas condiciones, detalles de diseño que no son importantes en climas templados y secos se convierten en factores vitales cuando el equipo es expuesto a climas húmedos y subhúmedos; cabe mencionar que todos los equipos telefónicos pueden ser expuestos a los diferentes climas que existen en toda la Republica Mexicana por lo que puede existir una variación muy significativa referente a la corrosividad ambiental y por ende en el deterioro y tiempo en que éste se presente. De lo observado se concluye la imperiosa necesidad de evitar al máximo la formación de celdas galvánicas, de mejorar la calidad de los revestimientos. Por otra parte las zonas que provocan la acumulación de condensado y la formación electrolitos también deben ser eliminados.

Dado que las condiciones de exposición típicas de los países en vías de desarrollo dan lugar a diferencias sensibles en el deterioro del equipo electrónico por efectos de corrosión atmosférica, es entonces que se justifica el presente estudio; ante la necesidad de implementar modelos que describan las condiciones de deterioro características a las zonas donde habita el mayor porcentaje de población (países subdesarrollados) y en donde se encuentra instalada una gran cantidad de equipo electrónico de todo tipo.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

La problemática que la mayoría de los usuarios tienen debido a descompostura ocasionada por la Corrosión Atmosférica en los equipos telefónicos, fue el motivo por el que se estudio y analizo estas probetas, procedentes de la parte central de la Republica Mexicana.

En estos dispositivos electrónicos se determino que se tiene el mismo tipo de atmósfera; es decir Urbano – Rural, así como muy parecidos sus climas pero con su propia característica de cada una de estas ciudades; debido a que en algunas de estas regiones son mas templados y secos que en otras, debido a esto se observo que si existe deterioro en ellos.

El estudio de estos teléfonos no fue simulado porque no se quería mejorar el diseño, si no más bien determinar que en estos mismos si existe Corrosión; primeramente el análisis de ellos, fue visual en el cual se observo que existía leve deterioro en las tarjetas electrónicas, para posteriormente examinarlos con mas exactitud con el microscopio electrónico; el cual arrojó que si existía presencia de Corrosión pero no en todos los componentes mas significativos de estas, a estos elementos se le hicieron sus correspondientes espectros los cuales confirmaron que si existe Corrosión; debido a que los componentes utilizados en los dispositivos electrónicos aunado con sus respectivos recubrimientos (níquel, estaño, etc) dan como consecuencia la perdida parcial o total a través de las discontinuidades y al desgaste que se generan por estos en las tarjetas electrónicas analizadas.

Esta investigación fue mas que nada experimental ya que todos los análisis hechos a estos componentes electrónicos – telefónicos, fue para corroborar que existía Corrosión y en algunos casos que con el tiempo se iba a evidenciar este problema en ellos.

Algunos de estos problemas son; mal funcionamiento como es el caso de falta y mala recepción de señal, tanto de llamadas entrantes como realizadas; falla por apagón o el no poder utilizarlo parcialmente o totalmente, debido a un corto circuito; perdida de la remarcacion de números y/o de identificación de llamadas, por el mal funcionamiento de los dispositivos de almacenamiento magnético, entre muchas causas mas.

Todos estos problemas se deben a la presencia de celdas galvánicas y/o en su caso a los gradientes de potencial para originar y provocar el efecto de corrosividad en los teléfonos, entre los que se destacan la Corrosión anódica; a su vez la presencia de Corrosión catódica, por las presencias de la humedad y a su vez utilizando una corriente invertida en complicidad con el aluminio, que a su vez provoca la Corrosión de este mismo elemento en complicidad solamente de la presencia de humedad; como también a los contaminantes atmosféricos entre los que se encuentran la presencia de Sulfatos, NO_x y a los contaminantes procedentes y utilizados del campo que provocan la Corrosividad en estas.

Cabe mencionar que todos estos equipos telefónicos, fueron diseñados, elaborados y fabricados para condiciones climáticas, meteorológicas y atmosféricas muy diferentes a las que existen o prevalecen a las ciudades estudiadas como son Celaya, Morelia y Querétaro.

Todo esto se debe a que en los países en vías de desarrollo no se tienen elementos suficientes para prevenir este fenómeno de corrosividad atmosférica, caso contrario al de los países desarrollados que si han hecho y realizado suficientes investigaciones para este problema y así evitarlo; como también han publicado artículos sobre este fenómeno.

En la Republica Mexicana es casi nulo el estudio del fenómeno atmosférico, a excepción de las ciudades del Distrito Federal y Tijuana; en la primera ciudad se tienen estudios semi avanzados de este problema los cuales se realizan y desarrollan en la UNAM, caso contrario para la segunda ciudad ya que se hacen estudios pero no en alguna empresas, Universidades y laboratorios, si no mas que nada de particulares para micro empresarios, en su efecto es casi nulo estos estudios e investigaciones de la contaminación atmosférica.

Todos estos estudios, análisis e investigaciones que se comentan traen como consecuencia a favor que si se tomaran en cuenta todos estos factores para prevenir este fenómeno de contaminación atmosférica; se tendría una mejor calidad en estos equipos telefónico, sin provocar contratiempos en fallas que se pueden prevenir, pero sobre todo que estos mismos equipos electrónicos no serian desechables si no que se garantizaría una mejor confiabilidad en estos mismos al adquirirlos, comprarlos y usarlos por los usuarios.

Se dejaría más que satisfecho, contento y convencido tanto a los propietarios como a los fabricantes de estos equipos electrónicos; a los productores porque se les comprarían mas aparatos de esta índole, permitiendo bajar los costos de producción de ellos; porque ya se tienen contemplados los inconvenientes de utilizar elementos que generen corrosividad, lo que provocara un aumento en la duración de la vida de estos teléfonos, que a su vez al consumidor final, le generara una mejora económica ya que estará obteniendo un producto que no le ocasionara contratiempos pero sobre todo de volver adquirir un teléfono.

1. <http://es.geocities.com/pirineosjuan/contamina.html>
2. <http://www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/10CAtm1/200Conta.htm>
3. http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_6.htm
4. Información Científica y Tecnológica Mes 8 Tomo (115) 19-21, 1986
5. http://www.tareas-ya.com/index.php?noticia_id=682
6. Rice, D.W., Cappell, R. J., Kinsolving, W., Laskowski, J. Indoor Corrosion of Metals., Journal of the Electrochemical Society, Vol.127, 1980
7. Rice, D.W., Peterson, P., Rigby, E.B., Phipps, P.B.P., Cappel, R.J. and Tremoureux, R.: Atmospheric Corrosion of Copper and Silver. Journal of the Electrochemical Society. Vol 128, No 2. 1981.
8. Rice, D.W., Phipps, P.B.P., Tremoureux, R.: Atmospheric Corrosion of Nickel. Journal of the Electrochemical Society. Vol 127, No 3. 1980
9. Tesis doctoral; Dr. Armando Ortiz Prado, Simulación acelerada de la corrosión atmosférica en equipo electrónico, UNAM; 2004.
10. White, E., Slensky, G., Dobbs B. Case Histories and Failures of Electronics and Communications Equipment. Metals Handbook, ASM International, Volumen 13, 1987
11. Carrato, A., Shaffer, I., Richwine, R. Corrosion in Naval Aircraft Electronics Systems. Corrosion 78, National Association of Corrosion Engineers, NACE, 1978
12. Guttenplan, J., Hasimoto, L. Corrosion Control for Electrical Contacts in Submarine Based electronic equipment. Materials Performance, Vol. 18, 1978
13. Department of the navy. Design guidelines for prevention and control of avionic corrosion. Navmat p 4855-2, 1983
14. Guttenplan, J. D. Corrosion in the Electronics Industry. Metals Handbook, ASM International, Vol. 13,1987
15. Abbott, W. Atmospheric Corrosion of Control Equipment. The Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries, Inc. NACE International, 1993
16. Yukonovich. Electronics. CC technologies laboratories, Inc. Dublín Ohio, 2001
17. Gouda, V. K., Carew, J. A., Riad, W.T. Investigation of Computer Hardware Failure due to Corrosion. British Corrosion Journal, Vol. 24, 192, 1989
18. Zakipour, S., Leygraf, C. Evaluation of Laboratory Tests to Simulate Indoor Corrosion of Electrical Contact Materials, Journal of the Electrochemical Society, Vol 133, 21, 1986
19. Oesh, S., Faller, M., Environmental Effects on Materials: The Effect of the Air Pollutants SO₂, NO₂, NO and O₃ on the Corrosion of Copper, Zinc and Aluminium A Short Literature Survey, and Results of Laboratory Exposures, Corrosion Science, Vol. 39, 105, 1997
20. Elshawesh, F. Atmospheric Corrosion of Aluminium Conductor. British Corrosion Journal. Vol 32, 1997
21. ISO 9223:1992 (E). Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres- Classification. International Standard Organization, 1992
22. Corrosive Effects of Phosphine, Carbon Dioxide, Heat and Humidity on Electronic Equipment. Agriculture and Agri-Food Canada, 2000

23. Kim, A., Crampton, G., Kanabus-Kaminska, M. Corrosion Effect of Hydrogen (HF) on Electronic Components. Proceedings of the 7th. Fire Supresión and Detection Research Application Symposium, Orlando Florida, 2003
24. Tidblad, J., Leygraf, C.: Acid Deposition Effects on Materials: Evaluation of Nickel and Copper. Journal of .the Electrochemical Society. Vol. 138 No. 12, 1991.
25. Arroyave, C., Morcillo, M., The Effect of Nitrogen Oxides in Atmospheric Corrosion of Metals., Corrosion Science, Vol. 37, 293, 1995
26. Cerrud, S., Ortiz, A., Jacobo, V., Schouwenaars, R. Design, Construction and Testing of a System for Accelerated Simulation of Damage by Atmospheric Corrosion on Electronic Equipment. Corrosion Reviews. Corrosion Reviews. Vol 21, 2003
27. <http://fotos.sureste.com/Infografias.asp>
28. Baboian, R. Electronics. Electrochemical and Corrosion Laboratory, Texas Instruments Inc., 2002.
29. Sinclair, J.D., Corrosion of Electronics. Journal of Electrochemical Society, Vol. 135 89c, 1988
30. Osenbach, J. Corrosion- Induced Degradation of Microelectronic Devices. Semiconductor Science Technology Vol. 11, 1996
31. http://209.85.165.104/search?q=cache:w2BjM5XudIkJ:omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_6.htm+Las+estaciones+se%C3%B1aladas+iniciaron+su+periodo+de+exposici%C3%B3n+de+metales+en+el+mes+de+agosto+de+1989&hl=es&ct=clnk&cd=1&gl=mx
32. Mariaca, R.L., Genesca, J., Uruchurtu, Ch., J. Corrosividad Atmosférica, Plaza y Valdez Editores- UNAM, 1999
33. Abbott., W. Corrosion of electrical contacts: review of flowing mixed gas test developments., British Corrosion Journal, Vol. 14, 153, 1989.
34. <http://www.elbalero.gob.mx/explora/html/atlas/climas.html>
35. Fukuda, Y., et al. Indoor Corrosion of Copper and Silver exposed in Japan an Asian Countries. Journal of the Electrochemical Society, Vol. 138, 1991
36. <http://planetageo.sites.uol.com.br/fmapas.htm>
37. <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mamb84&c=5938>
38. García, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, 4a edición, Instituto de Geografía UNAM, 1988.
39. Segundo Informe sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas (datos de 1995), INE-CENICA-JICA, 1997
40. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Información Geográfica, 2003.
41. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/regiones_hidrologicas.cfm?c=519
42. http://www.tareas-ya.com/index.php?noticia_id=1376#temperatura
43. <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mamb23&c=5831>
44. Cerrud, S., Jacobo, V. Ortiz, A., Schouwenaars, R. Análisis de Falla, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2002.

Bibliografía

45. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/gto/tem_med_an2.cfm?c=449&e=11&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
46. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/gto/precip_tot_an.cfm?c=452&e=11&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
47. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/gto/ubic_geo.cfm?c=442&e=11&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
48. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/mich/ubic_geo.cfm?c=442&e=16&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
49. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/mich/tem_med_an2.cfm?c=449&e=16&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
50. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/mich/precip_tot_an.cfm?c=452&e=16&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
51. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/qro/ubic_geo.cfm?c=442&e=22&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
52. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/qro/tem_med_an2.cfm?c=449&e=22&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
53. http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/qro/precip_tot_an.cfm?c=452&e=22&CFID=1972804&CFTOKEN=97882393
54. <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/mich/clim.cfm?c=444&e=22>
55. http://www.gsm-technology.com/index.php/en_US%2Cbrowse%2Cid_gr%2C286.html

Tabla 3.1. Emisiones totales de contaminantes atmosféricos más comunes en los países desarrollados [65].

Ciudad	Año	Contaminantes Monitoreados	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Montreal	1990	Bióxido de azufre	100	66	80	66	75	67	ND	ND	77	ND	ND
Canadá a/	1990	Dióxido de nitrógeno	100	91	68	81	74	67	ND	ND	66	ND	ND
	1990	Partículas	100	103	103	92	94	92	ND	ND	113	ND	ND
Nueva York	1990	Bióxido de azufre	100	96	87	76	80	59	62	59	ND	ND	ND
Estados Unidos b/	1990	Dióxido de nitrógeno	100	99	97	93	100	92	97	93	ND	ND	ND
	1990	Partículas	100	97	87	84	94	81	87	87	ND	ND	ND
México, D.F. b/ c/	1990	Bióxido de azufre	100	106	87	37	37	31	30	26	26	24	33
	1990	Dióxido de nitrógeno	100	98	98	100	88	74	88	79	69	64	71
	1995	Partículas	ND	ND	ND	ND	ND	100	120	122	116	84	86
Seúl	1990	Bióxido de azufre	100	85	68	45	37	33	25	22	16	14	ND
Corea del Sur d/	1990	Dióxido de nitrógeno	100	110	103	107	107	107	110	107	100	107	ND
	1990	Partículas	100	81	65	59	52	57	57	48	41	ND	ND
Tokio	1990	Bióxido de azufre	100	88	67	67	79	79	79	ND	67	67	79
Japón b/	1990	Dióxido de nitrógeno	100	106	103	120	116	116	113	ND	103	90	90
	1990	Partículas	100	114	95	72	70	91	91	ND	87	70	75
Berlín	1990	Bióxido de azufre	100	88	63	55	41	36	33	21	12	10	ND
Alemania	1990	Dióxido de nitrógeno	100	108	104	100	95	86	92	86	78	83	ND
	1990	Partículas	100	97	83	83	71	67	76	60	50	49	ND
Madrid	1990	Bióxido de azufre	100	94	84	70	64	45	44	28	44	40	ND
España e/ b/	1990	Dióxido de nitrógeno	100	86	87	79	78	72	74	72	69	70	ND
	1990	Partículas	100	102	100	106	117	98	102	79	74	81	ND
Helsinki	1990	Bióxido de azufre	100	92	46	46	46	27	40	27	27	27	ND
Finlandia f/ g/	1990	Dióxido de nitrógeno	100	95	97	95	88	83	88	76	81	81	ND
	1990	Partículas	100	89	85	75	68	68	59	69	69	49	ND
París	1990	Bióxido de azufre	100	88	71	54	50	46	ND	ND	43	ND	ND
Francia h/ i/	1990	Dióxido de nitrógeno	100	108	110	117	110	104	ND	ND	104	ND	ND
	1990	Partículas	100	75	45	45	38	42	ND	ND	41	ND	ND
Londres	1990	Bióxido de azufre	100	89	78	69	63	76	73	ND	45	42	39
	1990	Dióxido de nitrógeno	100	122	110	97	97	97	94	91	87	94	88

Moscú	1990	Partículas	100	94	78	77	62	74	68	ND	71	65	53
	1990	Bióxido de azufre	100	150	50	ND	ND	ND	ND	ND	150	ND	ND
	Rusia k/	1990	Dióxido de nitrógeno	100	100	100	ND	ND	ND	ND	ND	150	ND
Melbourne	1990	Partículas	100	109	100	ND	ND	ND	ND	ND	10	ND	ND
	1990	Bióxido de azufre	100	123	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Australia	ND	Dióxido de nitrógeno	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	1990	Partículas	100	97	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
a/	Partículas mayores a 75 micrómetros (μm).												
b/	Partículas menores a 10 micrómetros (μm).												
c/	Se refiere a datos de la zona metropolitana de la ciudad.												
d/	Partículas menores a 100 micrómetros (μm).												
e/	El número de estaciones de monitoreo difiere cada año. Para el caso de medición de Óxidos de Azufre (SO _x), el dato se refiere al centro de la ciudad.												
f/	Los datos corresponden a sitios de tráfico cercanos al centro de la ciudad.												
g/	Se refiere a Partículas Suspendidas Totales y las mediciones corresponden al centro de la ciudad.												
h/	Se refiere sólo a la aglomeración de París.												
i/	Partículas, sólo sitios urbanos.												
j/	Partículas, el dato se refiere a humo negro.												
k/	El método de medición puede no ser el más exacto, por lo que estos datos deben utilizarse con mucha precaución.												
ND	No disponible.												
FUENTE:	SEMARNAT. Compendio de Estadísticas Ambientales, 2002. México, D. F., 2003.												

Tabla 3.2. Principales estaciones de monitoreo y contaminantes monitoreados en 2006 [63].

Entidad federativa	Ciudad	Contaminantes Monitoreados						PST	
		O ₃	CO	SO ₂	NO ₂	NO _x a/	PM10 b/	c/	
Distrito Federal	ZMVM	20	25	26	19	19	22	13	
Jalisco	ZMG	8	8	8	8	8	8	0	
Nuevo León	ZMM	5	5	5	5	5	5	0	
México	ZMVT	5	4	7	7	7	7	7	
Aguascalientes	Aguascalientes	2	2	2	2	2	3	3	
Baja California	Tijuana	4	4	4	4	4	6	0	
Baja California	Mexicali	4	4	4	4	4	6	0	
Baja California	Tecate	1	1	0	1	1	1	0	
Chihuahua	Ciudad Juárez	3	3	0	0	0	6	0	
Coahuila de Zaragoza	Torreón	1	1	8	1	1	4	19	
Colima	Manzanillo	0	0	4	4	4	5	3	
Guanajuato	Celaya	3	2	2	3	3	0	0	
Guanajuato	Irapuato	3	3	3	3	3	0	0	
Guanajuato	Salamanca	3	3	3	3	3	3	1	
Guanajuato	Silao	0	0	0	0	0	0	0	
Puebla	Puebla	4	4	4	4	4	4	0	
Querétaro Arteaga	Querétaro	0	0	62	0	0	0	7	
San Luis Potosí	San Luis Potosí	1	1	11	1	1	2	10	
Sonora	Cananea	0	0	0	0	0	3	0	
Sonora	Cumpas	0	0	4	0	0	4	0	
Sonora	La Colorada	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Sonora	Nacozari	0	0	6	0	0	1	0	
Sonora	Nogales	0	0	0	0	0	0	0	
Veracruz de Ignacio de la Llave	Coatzacoalcos	0	0	0	0	0	0	0	

a/

A partir de 2004 las estaciones que miden Óxido de Nitrógeno (NO_x) no se reportan pues no se considera contaminante criterio. Partículas Menores a 10 microgramos (PM₁₀), no se considera considera aún como contaminante criterio, se incluye debido a la relevancia que ha adquirido y que se encuentra en marcha una iniciativa para normarlo. Se cuenta con estaciones de PM₁₀ automáticas y manuales, aquí se

b/

c/	proporciona la suma de ambas.
ND	Todas las estaciones de Partículas suspendidas totales reportadas son manuales; se incluyen las estaciones de monitoreo inventariadas durante 2004, sin especificar si están en instalación, reparación o en funcionamiento.
FUENTE:	No disponible. SEMARNAT. Compendio de Estadísticas Ambientales, 2005. México, D. F., 2006.